

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2013

JINDŘICH MAYRHOFER

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A INFORMATIKY
KATEDRA ELEKTROENERGETIKY

**ZKRATY V TŘÍFÁZOVÝCH STŘÍDAVÝCH
SOUSTAVÁCH**

**SHORT CIRCUITS IN THREE-PHASE AC
NETWORKS**

2013

JINDŘICH MAYRHOFER

Zadání bakalářské práce

Student: **Jindřich Mayrhofer**
Studijní program: **B2649 Elektrotechnika**
Studijní obor: **3907R001 Elektroenergetika**
Téma: **Zkratky v třífázových střídavých soustavách.
Short Circuits in Three-phase AC Networks.**

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor zkratových jevů
2. Metodika výpočtu zkratových poměrů dle EN 60909
3. Parametry prvků soustavy
4. Příklad výpočtu

Seznam doporučené odborné literatury:


1. Santarius, P.: Elektrické stanice a vedení, Skripta VŠB-TU Ostrava, 1990
2. Hodinka, M.: Přenos a rozvod elektrické energie, SNTL, 1989
3. Trojánek, Z.: Přechodné jevy v elektrizačních soustavách, SNTL 1987
4. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku, SNTL, 1991
5. Normy, firemní literatura, předpisy a směrnice ČEZu

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Dr. Ing. Jiří Gurecký**

Datum zadání: 30.11.2012

Datum odevzdání: 07.05.2013


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta:

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě

.....

Jindřich Mayrhofer

Prohlašuji, že:

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo,
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3),
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO,
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....
Jindřich Mayrhofer

Jméno a příjmení autora práce: Jindřich Mayrhofer

Adresa trvalého bydliště autora práce: V Besídkách 6, Ústí nad Labem

Poděkování:

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Dr. Ing Jiřímu Gureckému za odbornou pomoc, cenné profesionální rady, ochotu, pomoc s literaturou, vysvětlení nejasných záležitostí a metodické vedení práce.

Abstrakt: Bakalářská práce se zabývá teoretickým rozбором zkratových jevů, kde jsou popsány druhy zkratu, příčiny vzniku zkratu, následky zkratu a omezení zkratových proudů, metodikou výpočtu zkratových poměrů ve kterých je psáno o průběhu zkratových proudů, předpokladech výpočtu atd. a parametry prvků soustavy, kde je psáno o kabelových a elektrických parametrech venkovních vedení. V úvodu bakalářské práce je shrnuto, co zkrat vlastně znamená, jaké jsou nejčastější příčiny vzniku zkratu a jaké bývají následky vzniku zkratu. V poslední části bakalářské práce se věnuji příkladu výpočtu zkratových poměrů v přenosové soustavě.

Klíčová slova: Zkrat, vedení, elektrizační soustava.

Abstract: This thesis deals with theoretical analysis of short-circuit effects, where types, causes and consequences of short-circuits are summarized as well as limitations of short-circuit currents, by using a method of calculating short-circuit conditions in which the short-circuit currents are described, calculation assumptions and etc. And the parameters of system elements where cable and electrical parameters of overhead lines are started. At the beginning of this work I deal with what a short-circuit actually means, what are the most common causes of short-circuit and what are the consequences of short-circuit. The last part of the thesis is devoted to an example of calculation of short-circuit conditions in the transmission system.

Keywords: Short-circuit, lines, electricity system.

Seznam použitých symbolů a zkratk

α	Teplotní součinitel odporu
β	Teplotní součinitel odporu
ω (rad/s)	Úhlová frekvence
ε_r	Relativní permitivita vodiče
τ (s)	Doba, za kterou dojde k maximálnímu oteplení
η	Účinnost asynchronního motoru
κ	Součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
λ	Součinitel pro výpočet ustáleného zkratového proudu
μ	Součinitel pro výpočet souměrného zkratového vypínacího proudu
μ_0 (Hm ⁻¹)	Permeabilita vákua
μ_r	Poměrná permeabilita vzduchu obklopujícího vodič
π	Ludolfovo číslo (konstanta)
θ_e (°C)	Teplota vodiče na konci drát
ρ ($\Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$)	Rezistivita
γ_0 (S.m/mm ²)	Konduktivita
ϑ (°C)	Teplota
A	Počáteční hodnota stejnosměrné složky $I_{d.c.}$
B (S)	Kapacitní susceptance
C (F)	Kapacita
E'' (V)	Rázové napětí synchronního stroje
ES	Elektrizační soustava
F	Místo zkratu
G (S/m)	Konduktance
I_b (A)	Souměrný zkratový vypínací proud (efektivní hodnota)
$I_{d.c.}$ (A)	Stejnoseměrná složka zkratového proudu
I_k (A)	Ustálený zkratový proud (efektivní hodnota)
I_k'' (A)	Počáteční souměrný rázový zkratový proud
I_{LR} (A)	Souměrný záběrový proud asynchronního motoru
I_p (A)	Nárazový zkratový proud
I_q (A)	Fázor proudu jdoucí do dielektrika

I_r (A)	Jmenovitý proud elektrického zařízení
$\underline{I}_{(0)}$	Proud netočivé složkové soustavy
$\underline{I}_{(1)}$	Proud sousledné složkové soustavy
$\underline{I}_{(2)}$	Proud zpětné složkové soustavy
K_T	Korekční součinitel pro impedance
P (W)	Činný výkon
Q (VAr)	Jalový výkon
R_L (Ω)	Rezistance vedení
R (Ω)	Rezsistance
U_n (V)	Jmenovité napětí soustavy
U_{nHV} (V)	Jmenovité (velmi vysoké, zvláště vysoké) napětí
U_{nLV} (V)	Jmenovité nízké napětí
X (Ω)	Reaktance
X_L (Ω)	Induktivní reaktance
X_C (Ω)	Kapacitní reaktance
X_d příp. X_q	Synchronní reaktance podélná příp. příčná
X_d “ příp. X_q “	Rázová reaktance synchronního stroje, podélná příp. příčná
X_t (Ω)	Reaktance tlumivky
$X_{\sigma p}$ (Ω)	Rozptylová reaktance
Y_q (S)	Příčná admitance
Z (Ω)	Impedance
$\underline{Z}_{(0)}$ (Ω)	Netočivá impedance zkratového obvodu
$\underline{Z}_{(1)}$ (Ω)	Sousledná impedance zkratového obvodu
$\underline{Z}_{(2)}$ (Ω)	Zpětná impedance zkratového obvodu
$Z_{\sigma p}$ (Ω)	Rozptylová impedance vstupního napětí
Z_k (Ω)	Zkratová impedance trojfázové střídavé soustavy
\underline{a}	Komplexní konstanta
c	Napěťový součinitel
$cU_n I(3)^{1/2}$	Napětí ekvivalentního zdroje (efektivní hodnota)
f (Hz)	Kmitočet (50Hz)
r (m)	poloměr
t_k (s)	Doba trvání zkratu
t_r	Jmenovitý převod transformátoru

Obsah

1.	ÚVOD	11
2.	TEORETICKÝ ROZBOR ZKRATOVÝCH JEVŮ	12
2.1.	DRUHY ZKRATU	12
2.2.	PŘÍČINY VZNIKU ZKRATU	14
2.3.	NÁSLEDKY ZKRATU	15
2.4.	OMEZENÍ ZKRATOVÝCH PROUDŮ	17
2.5.	NÁZVOSLOVÍ A OZNAČOVÁNÍ ZKRATOVÝCH VELIČIN	18
3.	METODIKA VÝPOČTŮ ZKRATOVÝCH POMĚRŮ PODLE ČSN EN 60909	20
3.1.	PRŮBĚH ZKRATOVÉHO PROUDU	20
3.2.	PŘEDPOKLADY VÝPOČTU	21
3.3.	EKVIVALENTNÍ NAPĚŤOVÝ ZDROJ V MÍSTĚ ZKRATU	22
3.4.	POUŽITÍ SOUMĚRNÝCH SLOŽEK	23
3.5.	MAXIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	25
3.6.	MINIMÁLNÍ ZKRATOVÉ PROUDY	25
4.	PARAMETRY PRVKŮ SOUSTAVY	27
4.1.	ELEKTRICKÉ PARAMETRY VENKOVNÍCH VEDENÍ	27
4.1.1.	<i>Rezistance (elektrický odpor)</i>	<i>27</i>
4.1.2.	<i>Indukčnost a podélná impedance vedení</i>	<i>28</i>
4.1.3.	<i>Konduktance venkovních vedení</i>	<i>30</i>
4.2.	ELEKTRICKÉ PARAMETRY KABELOVÝCH VEDENÍ	30
4.2.1.	<i>Podélná impedance kabelových vedení</i>	<i>30</i>
4.2.2.	<i>Příčná admitance kabelových vedení</i>	<i>30</i>
4.2.3.	<i>Konduktance kabelových vedení</i>	<i>32</i>
4.2.4.	<i>Tlumivky v třífázové soustavě</i>	<i>32</i>
4.2.5.	<i>Kondenzátory</i>	<i>34</i>
4.2.6.	<i>Trojfázové transformátory</i>	<i>36</i>
5.	PŘÍKLAD VÝPOČTU ZKRATOVÝCH POMĚRŮ V PŘENOSOVÉ SOUSTAVĚ	38
6.	ZÁVĚR	49
	LITERATURA	50

1. Úvod

V elektrizačních soustavách se nejčastěji setkáváme s poruchami nazývanými zkraty. Zkraty jsou poruchy vznikající při spojení dokrátka dvou nebo tří fází a v soustavách s uzemněnou nulou také spojení jedné nebo více fází se zemí (resp. se středním vodičem). Při vzniku zkratu se v elektrizační soustavě mnohdy několikanásobně zmenšuje impedance mezi místem zkratu a napěťovým zdrojem. To má za následek vzrůst proudů ve větvích a pokles napětí v uzlech. Zejména v uzlech elektricky blízkých místu zkratu.

Nejčastějšími příčinami vzniku bývají poruchy izolace, které vznikají při přepětí, po úderu blesku, přímým poškozením venkovních vedení a kabelů nebo při nadměrném zestárnutí izolace. Elektrická zařízení jsou navrhována tak, aby vydržela všechny druhy zkratů a nepříznivé účinky zkratových proudů. Působení zkratových proudů je sice krátkodobé, ale vzhledem k velikosti tepelných a dynamických účinků proudů nebezpečné. Hluboké poklesy napětí vznikající při zkratech mohou působit rušivě na chod mnoha elektrických spotřebičů. Mohou být navíc příčinou narušení stability paralelního chodu alternátorů, což je vlastně jeden z nejnebezpečnějších následků zkratů, neboť postihuje provoz celé ES.

V dnešní době se účinky zkratových proudů zabývá norma ČSN EN 60909. Tato norma nyní nahrazuje normu ČSN 33 3020 ze září 1992 a ČSN 33 3022 z listopadu 1996. V normě ČSN EN 60909 je uveden jednotný postup výpočtu, kdežto v normě ČSN 33 3020 se připouští odlišné postupy při výpočtech zkratů. Tyto postupy se liší pracností a přesností.

2. Teoretický rozbor zkratových jevů

2.1. Druhy zkratu

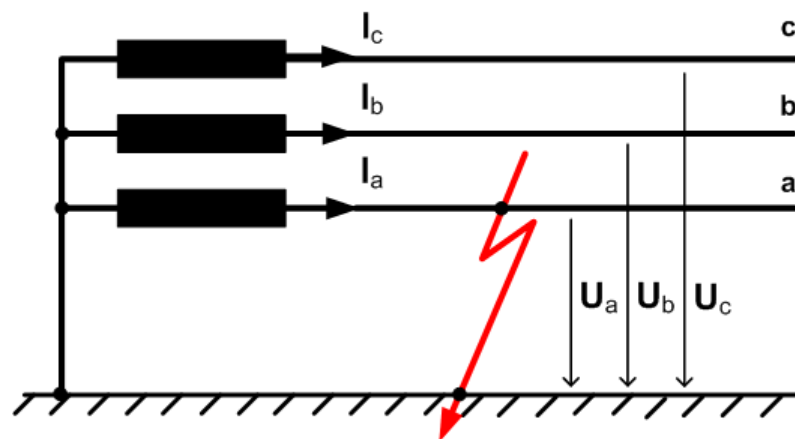
Zkraty dělíme na dvě kategorie na souměrné a nesouměrné zkraty.

Souměrné zkraty-

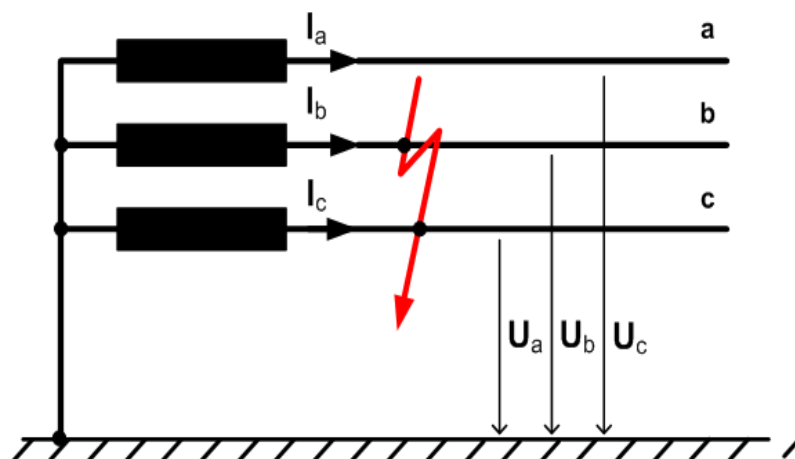
- Zkrat trojfázový.

Nesouměrné zkraty-

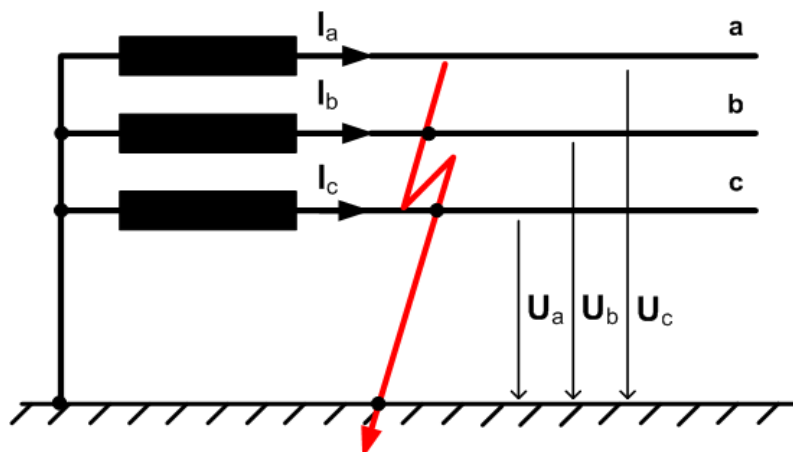
- Zkrat dvoufázový,
- zkrat dvoufázový zemní,
- zkrat jednofázový.



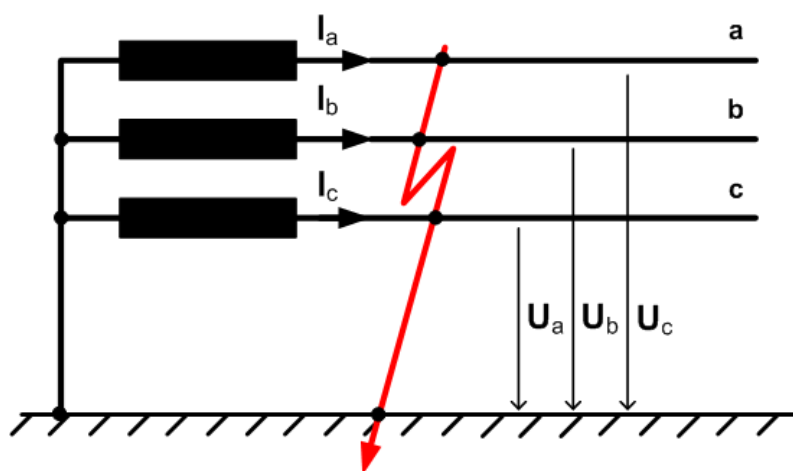
Obr. 1: Jednofázový zkrat



Obr. 2: Dvoufázový zkrat



Obr. 3: Dvoufázový zemní zkrat



Obr. 4: Třífázový zkrat

Tab. 1: Pravděpodobnost výskytu poruch v sítích VN a VVN

DRUH ZKRATU	PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU [%]		
	VN	110kV	220kV
TROJFÁZOVÝ	5	0,6	0,9
DVOUFÁZOVÝ	10	4,8	0,6
DVOUFÁZOVÝ ZEMNÍ	20	3,8	5,4
JEDNOFÁZOVÝ	*	91	93,1
*) V sítích VN, které se zpravidla provozují s uzlem izolovaným nebo nepřímou uzemněným, se tato porucha kvalitativně liší od zkratu a nazývá se zemní spojení.			

Zkrat souměrný třífázový- Když jsou zkratem postiženy všechny tři fáze najednou, jde o zkrat souměrný třífázový. Vodiči teče jeden stejný zkratový proud. U venkovních vedení se třífázový zkrat vyskytuje poměrně málo, kdežto u kabelových vedení se vyskytuje třífázový zkrat nejčastěji.

Zkrat dvoufázový- Vzniká, když se spojí dvě libovolné fáze v jednom místě.

Zkrat dvoufázový zemní- Vzniká pouze tehdy, když se spojí dvě libovolné fáze ještě zároveň se zemí.

Zkrat jednofázový- Vzniká u soustavy s uzeměným uzlem, pokud dojde ke spojení jakékoliv jedné fáze se zemí.

Dalšími druhy zkratu jsou zkrat dokonalý a zkrat nedokonalý.

Zkrat dokonalý(kovový)- Vzniká při dokonalém spojení fází. Impedance v místě spojení je zanedbatelná. Příčina tohoto zkratu je kovový předmět. Zkratový proud je větší při dokonalém zkratu, kdy se nevyskytuje přechodový odpor, proto se tento zkrat předpokládá při určování nejvyšších zkratových proudů.

Zkrat nedokonalý(odporový)- Nastává při nedokonalém spojení fází např. spadlou větví. Impedance již není zanedbatelná a má vliv na velikost zkratového proudu.

2.2. Příčiny vzniku zkratu

Zkraty v elektrizačních soustavách vznikají z několika důvodů:

- Nedostatky a vady,
- nedostatečná zkratová odolnost a nedostatečné vzdušné vzdálenosti (špatné dimenzování),
- poškození cizími zásahy a povětrnostními vlivy,
- chybná manipulace např. s odpojovači; spínání dvou nesynchronizovaných sítí,
- poškození izolace při manipulaci (montáže),
- cizími kovovými (vodivými) částmi na holých spojích,
- přepětím.

Nedostatky a vady elektrických zařízení- Je to velice častá příčina zkratů. Nejčastěji to bývá špatná izolace kabelů a přístrojů, znečištění nebo poškození (popraskání) izolátorů, vadné kontakty na přístrojích aj. Tyto nedostatky bývají způsobeny špatnou výrobou nebo k nim také může dojít v průběhu provozu. K předčasnému opotřebení izolace, k opálení kontaktů a k poškození spojů dochází nejčastěji proudovým přetížením. Tyto nedostatky a vady se většinou projevují až po delším provozu zařízení, kdy kvůli proudovému zatížení a hlavně přetížení dochází k uvolnění spojů, jejich nepřiměřenému zahřívání, elektrickému oblouku, ionizaci okolního prostředí a k mezifázovému zkratu. K poruše způsobené vadou izolace většinou nedochází při normálním jmenovitém napětí, ale až při přepětí.

Nedostatečná vzdušná doskoková vzdálenost- Nedostatečná vzdušná doskoková vzdálenost mezi živými částmi různého potenciálu nebývají časté. V rozvodnách jsou dodržovány vzdušné vzdálenosti, které jsou stanovené normou. U rozvaděčů jsou předepsány zkoušky zkušebním napětím. Nastane-li však vlivem dynamických sil při zkratu nebo jiným zásahem přiblížení vodičů pod předepsané vzdálenosti, je nutno počítat s tím, že vlivem přepětí (mnohdy už i provozního napětí) může dojít k přeskokům a ke zkratům.

Poškození cizími zásahy a povětrnostními vlivy- Dostali jsme se k nejčastější příčině vzniku zkratu. Většinou nastává u kabelových vedení

v zemi při výkopových pracích, úpravách terénu, opravách nebo stavbách vozovek, při stavebních pracích, kdy jsou kabely většinou zničeny bagry. V kabelových kanálech je nutné počítat s tím, že izolaci vodičů poškodí hlodavci. Venkovní vedení jsou nejčastěji poškozovány přírodními a povětrnostními vlivy- při pádu stromu a větví na vedení, krátkým dotykem větví vedení při větru. Bývá to velice často pouze přechodový děj. Když se přeruší oblouk který nastal při poruše, je vedení opět bez poruch

Chybná manipulace- U odpojovačů dochází nejčastěji k chybné manipulaci. Pomocí odpojovačů lze odpojit pouze určité malé proudy. Pokud chceme vypnout větší proudy, mezi kontakty odpojovače se objeví oblouk, kvůli kterému se prostředí mezi póly odpojovače zionizuje a v zápětí nastává třířázový zkrat.

Poškození izolace při manipulaci- Značný počet zkratů bývá způsoben i nedbalou montáží elektrických zařízení, hlavně pokud jde o uložení vodičů (otlačená izolace na ostrých hranách, neodborná spojení vodičů a jejich připojení na svorky strojů a přístrojů a neodborné provedení koncovek).

Přepětí- Jako jednu z nejčastějších příčin zkratu můžeme označit přepětí. Zkraty způsobené přepětím bývají hlavně v zařízeních, které nemají dostatečnou izolaci a nemají dostatečnou vzdušnou doskokovou vzdálenost. Přepětí také nastává v prostorech, kde jsou ztížené klimatické podmínky (místa nad 1000 m.n.m, kondenzace par při poklesu teploty atd.). Známe dva typy přepětí: atmosférická (vnější) a provozní (vnitřní).

Atmosférické přepětí – je přepětí, vznikající při působení atmosférického výboje na zařízení. Nejčastěji vzniká na venkovních vedeních, která proti atmosférickému přepětí chráníme svodiči přepětí (bleskojistkami). Atmosférické přepětí, které vzniká při nepřímém atmosférickém výboji se nazývá “indukované přepětí”.

Provozní přepětí – Jednou z příčin vzniku provozních přepětí jsou přechodné děje. Mezi ně patří:

- přechodné děje při poruchových stavech, zejména při zkratech a zemních spojeních,
- přechodné děje vzniklé při spínání a vypínání,
- přechodné děje při náhlé ztrátě zatížení (tzv. dynamické přepětí).

2.3. Následky zkratu

Mezi základní účinky zkratových proudů patří:

- pokles napětí ve zkratovém obvodu,
- ohrožení stability přenosu elektrické energie,
- tepelné,
- indukovaná napětí,
- dynamické,
- elektrický oblouk.

Pokles napětí ve zkratovém obvodu- Je charakterizován zpravidla větší hloubkou poklesu napětí a menší délkou trvání. Při vzniku zkratu v ES protéká daným zkratovým obvodem (od jednotlivých

napájecích bodů k místu poruchy) zkratový proud, který způsobuje na jednotlivých prvcích přenosových cest (vedení, transformátory) hluboké úbytky napětí. Nacházejí-li se v těchto bodech sítě odbočky s odběry, jsou tyto odbočky postižené snížením napětí, jehož hloubka je úměrná k elektrické vzdálenosti od místa poruchy (zkratu). Největší hloubka poklesu napětí je u odběrů nacházejících se v blízkosti místa zkratu. Délka trvání poklesu napětí je závislá od funkce ochran, od doby lokalizace místa poruchy a jeho následného odpojení. Délka poklesu se pohybuje řádově v jednotkách až desítkách period napájecího napětí.

Ohrožení stability přenosu elektrické energie- Na chod a stabilitu alternátorů, elektráren a rozvodných soustav mají zkraty nepříznivý vliv, protože se náhle změní hodnota zatížení a také proto, že dochází k poklesu napětí na svorkách alternátoru. Při zkratu dojde ke zmenšení činného výkonu alternátoru, hnací ústrojí zrychluje magnetové kolo a když nedojde k včasnému odpojení, dochází ke kývání alternátoru nebo také k porušení dynamické stability alternátoru, elektrárny nebo celých soustav. Pokud dojde ke snížení napětí na 70% svorkového napětí alternátorů vypadávají ze synchronismu. Tato hodnota vychází ze statistik. Jestliže chceme aby při zkratu nedocházelo k vypadnutí ze synchronismu, musíme v co nejkratší době zvýšit napětí na svorkách pomocí rychlorežulátoru.

Tepelné účinky- Při provozu vedení může dojít k průrazu izolace a tím ke zkratu. Důsledkem toho, než dojde k odpojení jistícím zařízením, prochází vodičem mnohonásobně vyšší proud než je jmenovitý. Za tuto krátkou dobu dochází k silovým a tepelným účinkům. Průchodem velkého proudu při zkratu vznikají ve vodiči vysoké teploty a dochází ke zničení izolace nebo i k požárům. Při zkratu se veškeré vytvořené teplo využije na oteplování vodiče a to vede k prudkému růstu teploty vodiče. Jelikož ke zkratu dochází ve velmi krátkém časovém úseku, nestačí teplo přejít do okolí. Odvod tepla je tak malý, že jej můžeme zanedbat. Oteplovací charakteristika má proto tvar přímky, kde max. oteplení dochází už za dobu τ .

Indukovaná napětí- Zkraty indukují indukované napětí na sousední vedení. Hlavně to jsou vedení slaboproudá, sdělovací, signální a jistící. Kolem těchto vedení se indukují značně velká napětí, hlavně když se zkratový proud vrací zpět přes zem. Funkce zařízení a bezpečnost osob je při práci na zařízení kvůli indukovaným napětím ohrožena.

Dynamické síly- Elektromagnetické působení proudu v okolních vodičích vyvolává dynamické síly, které jsou proudům přímo úměrné. První amplitudou zkratového proudu je způsoben největší ráz tj. nárazový zkratový proud. Bývá tak velký, že může vážně poškodit elektrická zařízení, jestliže jsou např. poddimenzovaná.

Dynamické síly namáhají vodiče na ohyb, působí na podpěrky a průchodky, namáhají vinutí a jejich upevnění (celá vinutí a póly alternátoru, vinutí transformátoru, měřících přístrojů, reaktoru a tlumivek), kabelové armatury a všechny přístroje, které leží ve zkratovém obvodu. U venkovních vedení, hlavně vvn, dynamické síly vyvolávají výkyvy vodičů a poté může docházet kvůli přílišnému přiblížení vodičů k přeskokům. Při ohybu vodičů při zkratu (např. přípojníc) často dochází k trvalé deformaci a takovému přiblížení, že může nastat nový zkrat. Poddimenzované podpěrky holých vedení, odpojovačů a dalších přístrojů se působením sil ulámou a může dojít i k přetrhání vinutí strojů a přístrojů. Taktéž se může stát, že dojde k vytažení nožů z odpojovačů a nastane nový obloukový zkrat.

Elektrický oblouk- Elektrický oblouk dosahuje při zkratech velkých výkonů a to 10^3 až 10^4 kW na 1cm délky hořícího oblouku. Tím se ohrožuje zařízení, ale hlavně elektrotechnický personál, který se soustřeďuje hlavně v elektrických stanicích, kde se i působení těchto poruch nejvíce projevuje.

Zkrat na vedení může vyvolat i výbuch příslušné kobky, nebo se v rozvodu přenesse na místa, kde kvalita izolace je snížena. Toto se zejména projevuje u rozvodných sítí vn izolovaných, tedy s kapacitním proudem nižším jak 10A, kde normy ČSN ještě nepožadují vykompenzování kapacitních proudů sítě např. indukčností Petersenovou cívkou, která je zapojena mezi uzel vinutí trať a pracovní uzemnění rozvodné stanice. [1]

2.4. Omezení zkratových proudů

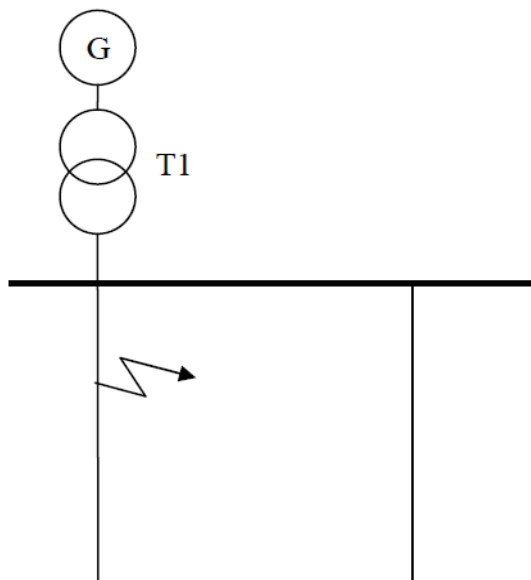
1) Zvětšením zkratové impedance:

- použitím transformátorů s větší impedancí,
- použitím reaktorů.

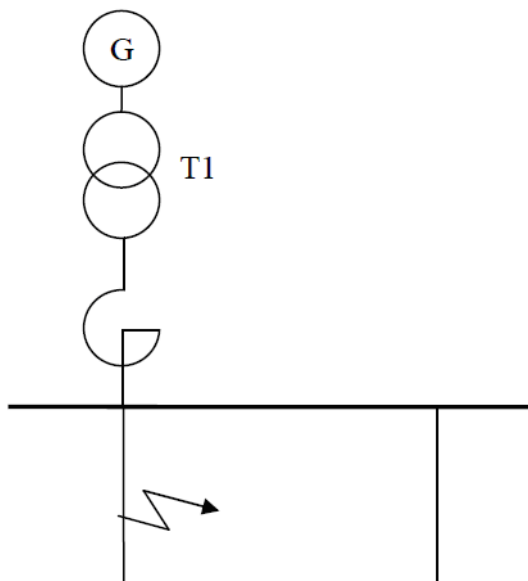
2) Zmenšením výkonu zdrojů:

- podélné dělení přípojníc,
- příčné dělení přípojníc.

Ad 1) Zvětšení zkratové impedance se dá docílit dvěma způsoby: Použitím transformátorů s větší impedancí nebo použitím reaktorů. Omezení zkratového proudu reaktorem: Je-li hodnota předpokládaného zkratu v nějakém místě tak velká, že energetické zařízení na něj není dimenzováno je nutné zkratovou impedancí zvětšit. Používáme k tomu cívky, které nazýváme tlumivky nebo častěji reaktory. Zařazením reaktoru do obvodu vzroste zkratová impedance. Na obrázku obr. 5. by byl případný zkratový proud omezen jen reaktancí generatoru a transformátoru. Na obrázku obr. 6. je navíc omezen ještě reaktancí reaktoru. [2]



Obr. 5: Omezení reaktancí generátoru



Obr. 6: Omezení reaktancí generátoru a reaktoru

Ad 2) Zmenšením výkonu zdrojů elektrické energie nemáme namysli jen použití zdrojů nižšího výkonu (nedokázali bychom totiž dodat potřebné množství energie odběrateli), ale hlavně dělení zdrojů na samostatné úseky přípojníc, tak aby nepracovaly paralelně. Jde-li o jeden zdroj (např. transformátor) který má příliš velký výkon, musíme jej nahradit a rozdělit na několik menších zdrojů do oddělených úseků přípojníc. [2]

2.5. Návosloví a označování zkratových veličin [4]

Návosloví podle normy ČSN EN 60909

Zkratový proud: nadproud v důsledku zkratu v elektrické soustavě, je nutno rozlišovat proud tekoucí v místě zkratu a proudy ve větvích na jakémkoli místě sítě.

Předpokládaný zkratový proud: proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení.

Souměrný zkratový proud: efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou proudu

Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k : efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci

Stejnosměrná (aperiodická) složka I_{dc} zkratového proudu: střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu klesající ze své počáteční hodnoty k nule

Nárazový zkratový proud I_p : maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu. Velikost tohoto proudu závisí na okamžiku, v němž ke zkratu došlo. Výpočet třífázového nárazového zkratového proudu I_p se aplikuje na fázový vodič a okamžik, ve kterém vznikne největší možný zkratový proud. Nesoučasné zkraty se neuvažují.

Souměrný zkratový vypínací proud I_b : efektivní hodnota úplné periody souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku oddělení kontaktů prvního pólu spínacího zařízení

Ustálený zkratový proud I_k : efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu

Záběrový proud I_{LR} : největší souměrný efektivní proud asynchronního motoru se zabrzděným rotorem, který je napájen jmenovitým napětím U_{TM} při jmenovitém kmitočtu

Jmenovité napětí sítě U_n : sdružené napětí, kterým je síť označena a k němuž se vztahují provozní charakteristiky

Napětí ekvivalentního zdroje $cU_n I(3)^{1/2}$: napětí ideálního zdroje přiložené v místě zkratu v sousledné složkové soustavě pro výpočet zkratového proudu; jedná se o jediné aktivní napětí sítě

Napěťový součinitel c : poměr mezi napětím ekvivalentního napěťového zdroje a jmenovitým napětím sítě U_n děleným $(3)^{1/2}$. Uvedený napěťový součinitel je nutný z následujících důvodů: - kolísání napětí v závislosti na čase a místě

- přepínání odboček transformátoru,
- zanedbání zátěže a kapacitních reaktancí při výpočtu,
- chování motorů a generátorů při přechodném ději.

Rázové napětí synchronního stroje E : efektivní hodnota souměrného vnitřního napětí synchronního stroje, které působí za rázovou reaktancí X_d v okamžiku zkratu

Elektricky vzdálený zkrat- zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní

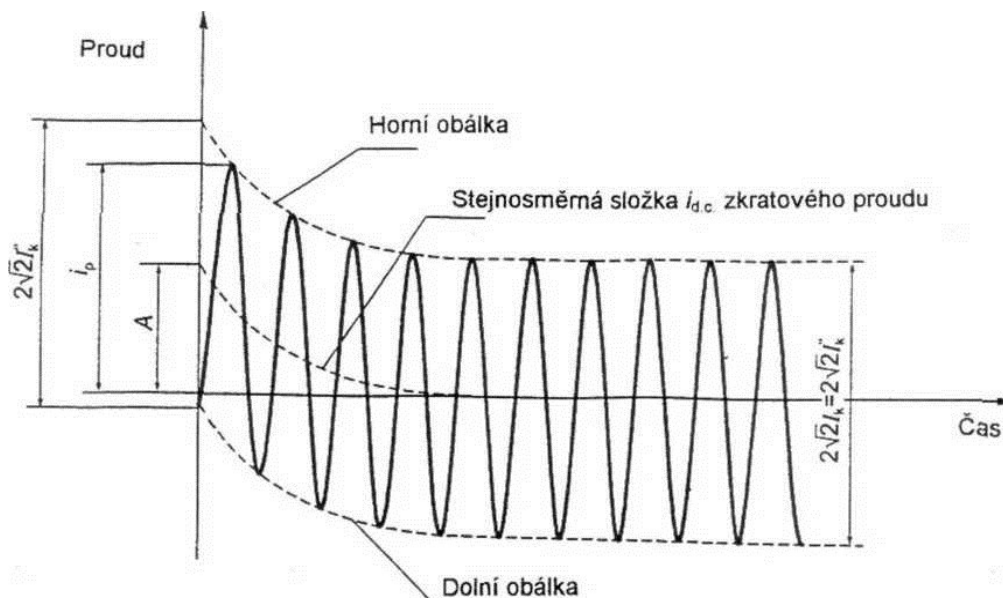
Elektricky blízký zkrat- zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních motorů překračuje 5 % počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k bez motoru

Doba trvání zkratu t_k : doba od okamžiku vzniku zkratu až do jeho konečného okamžitého vypnutí ve všech fázích postižených zkratem.

3. Metodika výpočtů zkratových poměrů podle ČSN EN 60909 [4]

3.1. Průběh zkratového proudu

Kompletní výpočet zkratových proudů určuje proudy jako funkce času v místě zkratu od počátku zkratu až do jeho konce. Zkratové proudy odpovídají okamžité hodnotě napětí na počátku zkratu.



Obr. 7: Zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou (schématický diagram)

I_k'' - počáteční souměrný rázový zkratový proud

I_p - nárazový zkratový proud

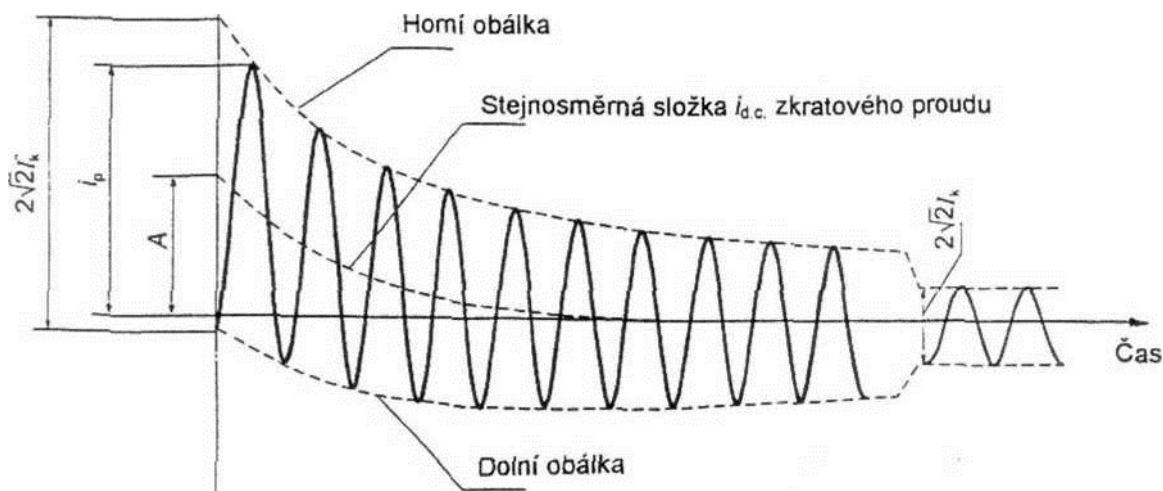
I_K - ustálený zkratový proud

$I_{d.c.}$ - stejnosměrná složka zkratového proudu

A - počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$

Ve většině praktických případů takovýto výpočet není nutný. Podle použití výsledků nás zajímá efektivní hodnota souměrné střídavé složky a nárazový zkratový proud i_p zkratového proudu po vzniku zkratu. Nejvyšší hodnota i_p závisí na časové konstantě zanikající aperiodické složky a kmitočtu f , tedy na poměru RIX nebo X/R zkratové impedance Z_k a s určitou přibližností lze předpokládat, že je jí dosahováno tehdy, jestliže zkrat začíná v okamžiku, kdy napětí prochází nulou. Proud i_p též závisí na klesající souměrné střídavé složce zkratového proudu.

V mřížových sítích je několik časových konstant. Z toho důvodu není možné určit zcela přesnou metodu výpočtu i_p a $i_{d.c.}$.



Obr. 8: Zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou (schématický diagram)

I_k'' - počáteční souměrný rázový zkratový proud

i_p - nárazový zkratový proud

I_k - ustálený zkratový proud

$i_{d.c.}$ - stejnosměrná složka zkratového proudu

A - počáteční hodnota stejnosměrné složky $i_{d.c.}$

3.2. Předpoklady výpočtu

Výpočet maximálních a minimálních zkratových proudů vychází z následujících zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění typ zkratu, tj. trojfázový zkrat zůstává trojfázovým a zkrat mezi fází a zemí zůstává po celou dobu zkratu zkratem mezi fází a zemí
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze. To je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory.
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admittance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány vyjma paralelních admittance v netočivé soustavě.

Výpočty zajišťují dostatečnou přesnost výsledků, i když tyto předpoklady pro uvažované elektrické soustavy neodpovídají zcela přesně dané skutečnosti.

Pro souměrné a nesouměrné zkraty je vhodné počítat zkratové proudy pomocí metody souměrných složek.

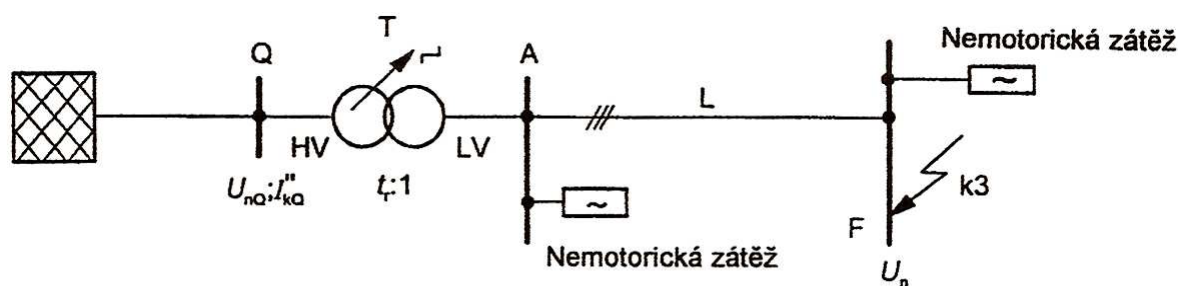
Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z jedné napěťové hladiny na jinou, obvykle na tu napěťovou hladinu, ve které se má určit zkratový proud. Pokud jsou tyto soustavy koherentní, tj. $U_{rTHV}/U_{rTLV} =$

U_{nHV}/U_{nLV} všechny transformátory v soustavě, není tento přepočet nutný. Poměr U_{rTHV}/U_{rTLV} se obvykle nerovná U_{nHV}/U_{nLV} (viz IEC 60909-2 a příklady uvedené v IEC 60909-4).

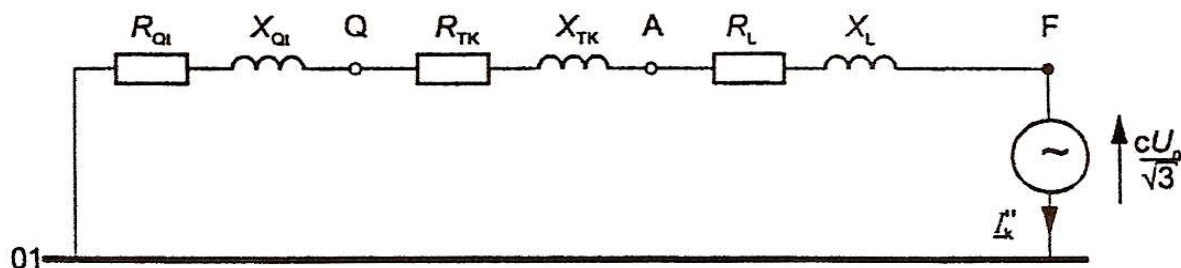
Impedance zařízení v sítích vyšších a nižších napětí musí být vyděleny nebo vynásobeny čtvercem jmenovitého převodu transformátoru t_r . Napětí a proudy musí být přepočteny jmenovitým převodem transformátoru t_r .

3.3. Ekvivalentní napěťový zdroj v místě zkratu

Metoda použitá pro výpočet je založena na zavedení ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu. Ekvivalentní napěťový zdroj je jediným aktivním napětím soustavy. Všechny síťové napáječe, synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazovány svou vnitřní impedancí. Ve všech případech se k určení zkratového proudu v místě zkratu F použije ekvivalentní napěťový zdroj. Provozní údaje o odběrech, o poloze přepínače odboček transformátorů, buzení generátorů, atd. jsou postradatelné; odpadá nutnost provádět výpočty toků výkonů v různých stavech před zkratem.



Obr. 9: Schéma soustavy



Obr. 10: Náhradní schéma obvodu sousledné složky soustavy

Obrázky 9 a 10 znázorňují příklad ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu F jakožto jediného aktivního napětí soustavy napájené transformátorem bez nebo s přepínači odboček. Všechna další aktivní napětí v soustavě jsou nulová. Nadřazená soustava na obrázku 9 je respektována pouze její vlastní vnitřní impedancí Z_{Q1} , přepočtenou na stranu nižšího napětí transformátoru a transformátorem pomocí své impedance vztažené na stranu nižšího napětí. Paralelní admitance (například kapacita vedení a pasivní zátěže) není nutno při výpočtu proudů obvodu na obrázku 10 uvažovat.

Když neexistují příslušné národní normy je nejvhodnější stanovit napěťový součinitel c podle tabulky 2, předpokládáme přitom, že se nejvyšší napětí v běžném systému bez poruchy nebude od jmenovitého napětí lišit v průměru o více než +5 % (na straně nižšího napětí) nebo o +10 % (na straně vyššího napětí) od jmenovitého napětí systému U_n .

Tab. 2: Napěťový součinitel c

Jmenovité napětí U_n	Napět'ový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $c_{\max}^{1)}$	minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1 000 V (IEC 60038, tabulka I)	1,05 ³⁾ 1,10 ⁴⁾	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV (IEC 60038, tabulka III)	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tabulka IV)		

¹⁾ $c_{\max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{\max}U_n = U_m$ nebo $c_{\min}U_n = 0,90 \times U_m$.

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V.

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %.

3.4. Použití souměrných složek

Výpočet hodnot proudů v trojfázových střídavých soustavách při souměrných a nesouměrných zkratech se zjednoduší použitím souměrných složek. Předpokládá se přitom, že elektrické zařízení má symetrickou strukturu, například v případě transponovaných venkovních vedení. Výsledky výpočtu zkratových proudů mají přijatelnou přesnost také i v případě netransponovaných venkovních vedení.

Při použití této metody se zjistí proudy v každé fázi superponováním proudů tří souměrných složkových soustav:

- Proud netočivé složky soustavy $\underline{I}_{(0)}$
- Proud sousledné složkové soustavy $\underline{I}_{(1)}$
- Proud zpětné složkové soustavy $\underline{I}_{(2)}$

Budeme-li fázi L1 považovat za referenční potom budou proudy $\underline{I}_{(L1)}$, $\underline{I}_{(L2)}$, a $\underline{I}_{(L3)}$.

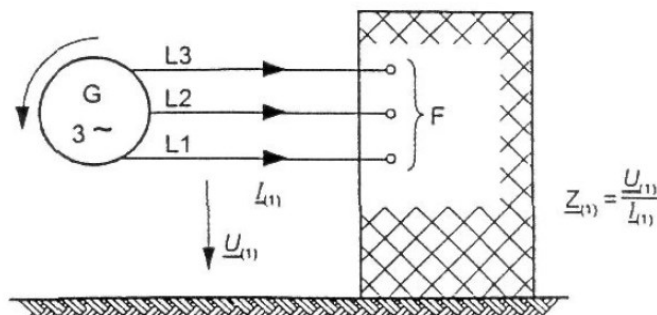
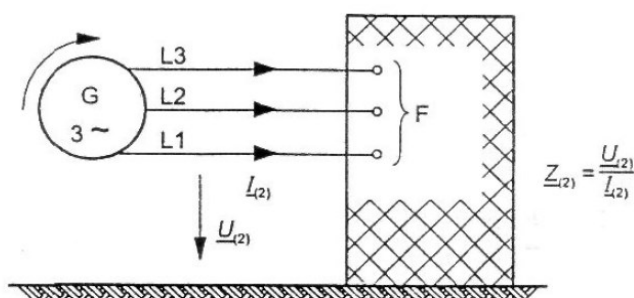
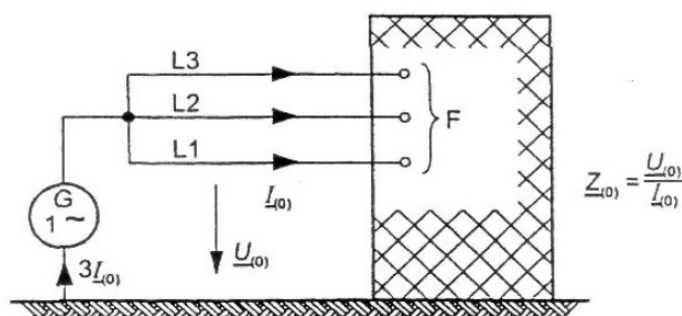
$$\underline{I}_{L1} = \underline{I}_{(1)} + \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (1)$$

$$\underline{I}_{L2} = a^2 \underline{I}_{(1)} + a \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (2)$$

$$\underline{I}_{L3} = a \underline{I}_{(1)} + a^2 \underline{I}_{(2)} + \underline{I}_{(0)} \quad (3)$$

$$a = -\frac{1}{2} + j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (4)$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{1}{2}\sqrt{3} \quad (5)$$

Obr. 11: Sousedná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(1)}$ Obr. 12: Sousedná složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(2)}$ Obr. 13: Netočivá složka zkratové impedance $\underline{Z}_{(0)}$

Sousednou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(1)}$ v místě zkratu F určíme podle obrázku 11, když souměrnou soustavu napětí sousledné složky v odpovídajícím pořadí fází (kladném) přiložíme do místa zkratu F, všechny synchronní a asynchronní stroje jsou nahrazeny jejich vnitřními impedancemi.

Zpětnou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(2)}$ v místě zkratu F určíme podle obrázku 12, když souměrnou soustavu napětí zpětné složky v odpovídajícím pořadí fází (záporném) přiložíme do místa zkratu F.

Hodnoty sousledných a zpětných impedancí se mohou navzájem lišit pouze v případě točivých strojů. Pokud se počítají elektricky vzdálené zkraty, je obecně dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(2)} = \underline{Z}_{(1)}$.

Netočivou zkratovou impedanci $\underline{Z}_{(0)}$ v místě zkratu F určíme podle obrázku 13, když přiložíme střídavé napětí mezi třemi zkratovanými fázemi a společným zpětným vedením (například zemnicí soustavou, nulovým vodičem, zemnicími vodiči, stíněním kabelu a pláštěm

kabelu).

Při výpočtu nesouměrných zkratových proudů v soustavách vysokého, velmi vysokého a zvláště vysokého napětí s použitím ekvivalentního napěťového zdroje v místě zkratu se musí uvažovat kapacita netočivé složky vedení pro soustavy s izolovaným uzlem, rezonančně uzemněné soustavy a soustavy s uzemněným uzlem se zemnicím faktorem vyšším než 1,4 (viz IEC 60071-1).

Kapacity vedení (venkovních vedení a kabelů) v soustavách nízkého napětí se mohou zanedbat pro sousledné, netočivé a zpětné soustavy. Zanedbání netočivé složky kapacit vedení v soustavách s uzemněným uzlem vede k výsledkům, které jsou mírně vyšší než skutečné hodnoty zkratových proudů. Odchylka závisí na konfiguraci sítě.

Mimo zvláštních případů se netočivé zkratové impedance v místě zkratu liší od sousledných a zpětných zkratových impedancí.

3.5. Maximální zkratové proudy

Při výpočtu maximálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet maximálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{max} podle tabulky 2, pokud není příslušná národní norma;
- vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu nebo pro přijaté dělení sítě pro omezení zkratového proudu;
- pokud je použita ekvivalentní impedance Z_0 jako reprezentující vnější sítě, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů;
- motory musí být zahrnuty podle potřeby v souladu s normou;
- uvažují se rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20 °C.

3.6. Minimální zkratové proudy

Při výpočtu minimálních zkratových proudů je nutné zvolit následující podmínky:

- pro výpočet minimálních zkratových proudů se musí použít napěťový součinitel c_{min} podle tabulky 2;
- vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu;
- motory musí být zanedbány;
- rezistance R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě:

$$R_L = [1 + \alpha(\theta_e + 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20} \quad (6)$$

Kde:

R_{L20} je resistance při teplotě 20°C

θ_e je teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu

α je součinitel rovný 0,004/K, platný s dostatečnou přesností pro praktické účely pro měď, hliník a slitinu hliníku.

4. Parametry prvků soustavy

4.1. Elektrické parametry venkovních vedení

4.1.1. Rezistance (elektrický odpor)

Tato veličina byla dříve nazývána jako činný odpor nebo ohmický odpor. Vodiči venkovních vedení jsou dráty, popř. lana z jednoho nebo dvou materiálů. Např. lano AlFe6 se skládá z vnitřního lana (nosné), které je ocelové a je tam kvůli mechanickým požadavkům a ze 6-ti lan hliníkových, která jsou navinuta na ocelové lano a slouží k vedení proudu. Specialitou jsou dutá lana, která se u nás v republice nepoužívají.

Při ustáleném ss proudu platí pro odpor vodičů o průřezu A a rezistivitě ρ_0 při teplotě ϑ_0 na jednotku délky vztah:

$$R_{ss01} = \frac{\rho}{A} \text{ (}\Omega \cdot \text{m}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

Místo rezistivity ρ_0 se občas používá konduktivita $\gamma_0 = 1/\rho_0$. Resistance je konstanta pro neferomagnetické materiály a funkce proudu pro feromagnetické materiály.

Pro stanovení resistance při provozu je nutno uvážit:

- Materiál a jeho čistotu- respektujeme rezistivitou ρ_0 , předepsanou normou pro teplotu ϑ_0 (20°C). U dobrých vodičů ϑ_0 roste nelineárně se stoupajícím obsahem nečistot. Pro feromagnetické materiály je závislost na proudu zjišťována experimentálně.
- Teplotu- teplota se respektuje činitelem

$$K_{\vartheta} = 1 + \alpha(\vartheta - \vartheta_0) + \beta(\vartheta - \vartheta_0)^2 \quad (8)$$

α , β jsou teplotní činitele odporu

ϑ je uvažovaná teplota

- Povrchový jev (skinefekt)- Proud se nerovnoměrně rozloží průměrem vodiče. Výsledkem tohoto jevu je zvětšení resistance v porovnání s odporem pro ss proud. Zavedením činitele k_s vyjadřujeme zvětšení resistance. Vodiče Al mají menší činitel k_s než vodiče Cu stejného průměru.
- Kroucení lan- Kvůli kroucení lan dojde ke zvýšení resistance proti plnému vodiči stejné osově délky. Kroucení lan způsobí zvětšení resistance asi o 2% u lan Cu a 2 až 5% u lan Al; většinou se respektuje v hodnotách resistance, které jsou uvedeny v normě.
- Odchylku skutečného průřezu- V normách jsou uváděny jmenovité hodnoty průřezů, to jsou zaokrouhlené hodnoty skutečných průřezů. Proto není doporučován výpočet resistance s použitím jmenovitého průřezu místo průřezu skutečného.
- Průhyb

Ve skutečnosti se při výpočtech rezistivity počítá pouze s vlivy teploty a povrchovým jevem. Povrchový jev je respektován v tabulkách resistancí v příslušné normě. [3]

4.1.2. Indukčnost a podélná impedance vedení

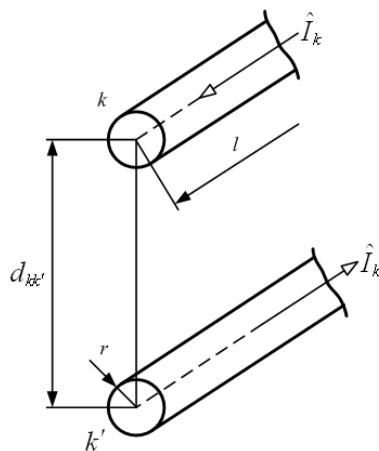
Konkrétním cílem je vytvořit matematický model široké použitelnosti. Soustava skutečných vodičů, které jsou rovnoběžné jednak (při zanedbání průhybu) s rovinou povrchu ideální země a jednak mezi sebou navzájem, se doplní soustavou fiktivních vodičů, rovnoběžných se skutečnými vodiči. Místo uspořádání vodiče a rovina země, dostáváme uspořádání dvojic vodičů navzájem rovnoběžných, respektujících existenci jak povrchu země, tak i země samé. [3]

Indukčnost a impedance ve smyčce- Ve smyčce tvořené dvěma stejnými přímými a rovnoběžnými vodiči kruhového průřezu o poloměru r a stejného konstrukčního provedení předpokládáme:

$$r \ll d \ll l \quad (9)$$

$$d_{kk} = d \quad (10)$$

$$\mathbf{I}_k = -\mathbf{I}_{k'} \quad (11)$$



Obr. 14: Dva vodiče smyčky

Po fázory proudů platí $\mathbf{I}_k = -\mathbf{I}_{k'}$. Uvažujeme poměry na jednotku délky uvnitř smyčky ve značné vzdálenosti od konců obou vodičů; pak se vliv deformace magnetického pole vlivem konců vodičů neuplatní.

Vnitřní indukčnost (mag. tok uvnitř vodiče):

$$L_{ik} \frac{\mu_0 \mu_{rv}}{8\pi} \cdot \alpha \quad (12)$$

μ_{rv} je poměrná permeabilita materiálu vodiče

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$$

α je nerovnoměrnost rozdělení proudu po průřezu

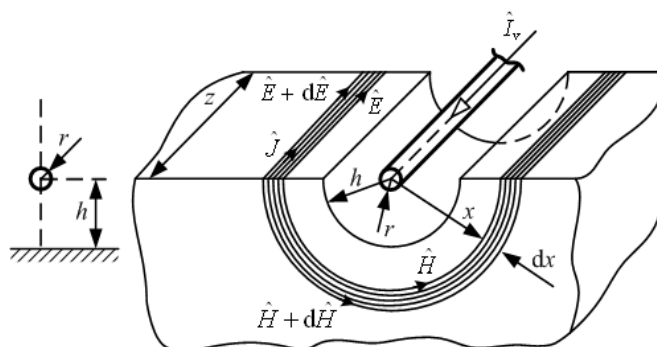
Vnější indukčnost (mag. tok vně vodiče):

$$L_{ek} \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cdot \ln \frac{R}{r} \quad (13)$$

je poměrná permeabilita vzduchu obklopujícího vodič. $\mu_r = 1$

Země jako vodič stacionárního střídavého proudu – Rüdenbergova koncepce

Hustota střídavého proudu v zemi je nerovnoměrná, největší přímo pod vedením.



Obr. 15: Skutečné a modelové uspořádání vodič- zem

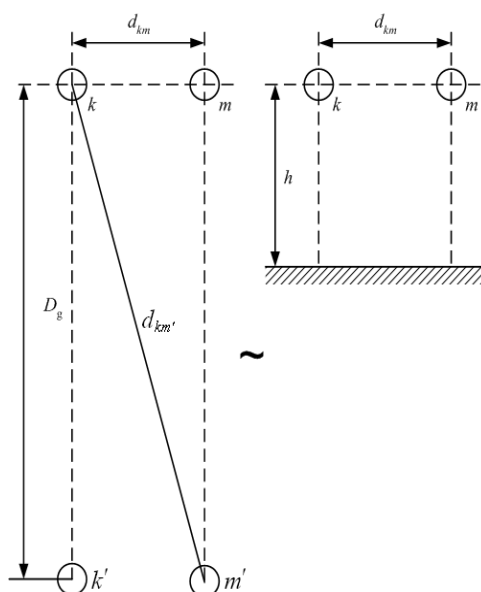
Vlastní impedance smyčky vodič-zem

3 složky:

- R_{lk} - rezistance respektující ztráty výkonu ve vodiči
- X_{lk} - reaktance respektující složku mag. toku spřaženého s vodičem a uzavírajícího se ve vodiči a ve vzduchu
- Z_{lg} - impedance respektující složku mag. toku v zemi v záběru s vodičem

Vzájemná impedance 2 smyček vodič-zem- dvouvodičové jednofázové vedení $d_{km} \leq h$

→ zpětné proudy se navzájem kompenzují



Obr. 16: Dvouvodičové vedení a jeho model

$D_g \gg d_{km} \rightarrow$ výsledné elmag. působení zpětných proudů ve vodičích k' , m' na skutečné vodiče k , m je téměř nulové

4.1.3. Konduktance venkovních vedení

Ztráty činného výkonu, které jsou málo závislé na zatížení a hodně závislé na napětí a povětrnostních vlivech způsobuje konduktance. Přesnými matematickými vzorci je nedokážeme vyjádřit. Dělí se na převládající ztráty korónou a na ztráty svodem přes izolátory. Ztráty korónou, zvětšující se za špatného počasí, např. pokud je mlha, déšť, sněžení atd. se více uplatní až od $U_n=110\text{kV}$.

Ztráty činného výkonu neboli ztráty příčné se většinou uvažují u $U_n>110\text{kV}$ a to pouze, když počítáme podrobnější výpočty. Když porovnáme ztráty činného výkonu způsobené resistancemi a příčné ztráty, tak příčné ztráty jsou malé. Nepříznivě se tady ale projevuje koróna (rušení, vyšší harmonické). [3]

4.2. Elektrické parametry kabelových vedení

V městských a průmyslových rozvodech s běžně používají kabely s U_n do 35kV, kabely s vyšším U_n se používají ve velkoměstech a nebo ve zvláštních případech. Pořizovací cena kabelových vedení je mnohem vyšší než u venkovních vedení. Pro napětí 230/400 se používají většinou trojfázové kabely. Tyto vodiče jsou izolovány nejčastěji (PVC, polyethylen, napouštěný papír)

Pro napětí 22 a 35kV se také používají třífázové kabely, ale každá žíla má buď olověný plášť a nebo kovovou fólii nebo pokovený papír. Celý kabel má olověný plášť a další krycí obaly. Začínají se používat kabely s jednou žílou izolované síťovaným polyethylenem.

Pro napětí 110 až 380kV jsou používány jediné jednožilové kabely se speciální konstrukcí. Na trojfázové narazíme výjimečně. [3]

4.2.1. Podélná impedance kabelových vedení

Je tvořena rezistancí R a induktivní reaktancí X_L . S malými odchylkami se dají použít rovnice stejné jako u venkovního vedení. Jediným případem geometricky souměrného vedení je trojfázový kabel; v ostatních případech musíme symetrizovat, když je potřeba.

Transponování u jednožilových kabelů uložených vedle sebe se využívá pouze při větších délkách a napětí 110kV nebo vyšším. Když jsou uspořádány jednožilové kabely do rovnostranného trojúhelníka není transponování potřeba.

Resistance se určí stejně jako u venkovního vedení. [3]

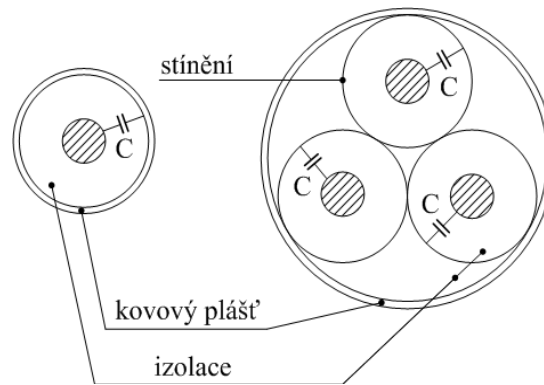
4.2.2. Příčná admitance kabelových vedení

Je tvořena konduktancí G a kapacitní susceptancí $B=\omega C$. Rozdílné hodnoty jsou způsobeny izolačními materiály vodičů a různým konstrukčním uspořádáním.

Kapacity kabelových vedení

3 typy kabelů:

- celoplastové (bez vodivého pláště)- Kapacita se mění podle způsobu uložení a okolí. Určuje se měřením.
- jednožilové s kovovým pláštěm nebo vícežilové s pláštěm pro každý vodič



Obr. 17: Jednožilový s kovovým pláštěm a trojžilový kabel s pláštěm pro každý vodič

Pro sousý válec:

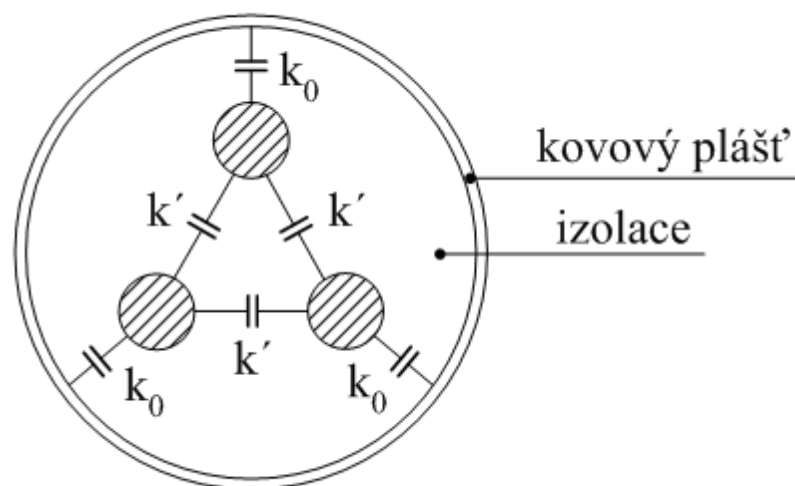
$$C = \frac{0,0242 \cdot \varepsilon_r}{\log \frac{r_2}{r_1}} \quad (14)$$

ε_r ...relativní permitivita izolace

r_1 ...poloměr vodiče

r_2 ...střední poloměr pláště

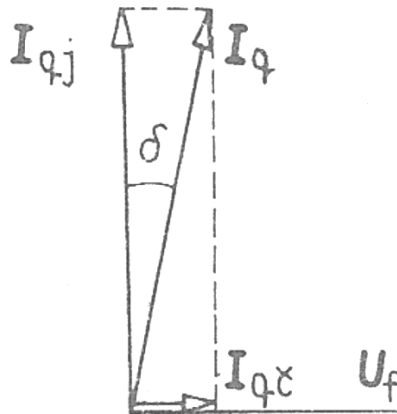
- trojžilové se společným kovovým pláštěm- Nemají kovový obal na každé žíle, ale pouze jeden kovový plášť na všechny tři žíly. Kromě provozní kapacity jsou tu i další kapacity: vzájemná kapacity c' a kapacita k plášti c_0 . Tyto kapacity jsou pro všechny fáze stejné s ohledem na geometrickou souměrnost tohoto vedení. [3]



Obr. 18: Kapacitní schéma

4.2.3. Konduktance kabelových vedení

Souvisí s dielektrickými ztrátami v izolaci kabelu, namáhané napětím. Na obrázku 19 značí I_q fázor proudu jdoucího do dielektrika kabelu, tedy napříč k vodiči kabelu, na 1 km délky.



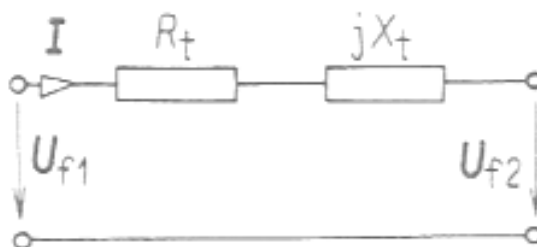
Obr. 19: Proud jdoucí do dielektrika

Konduktance na 1 km délky bude $G_l = \frac{\Delta P_{dl}}{U_f^2}$ (S.km⁻¹) a respektuje se u řádně udržovaných kabelů až od $U_n=220\text{kV}$, pokud nejde o výpočet ztrát.

4.2.4. Tlumivky v třífázové soustavě

Jsou to přístroje které mají v každé fázi pouze jedno vinutí, popř. mají jenom jedno vinutí celkově. Spotřebovávají převážně jalový indukční výkon a jejich spotřeba činného výkonu by měla být co nejmenší. Známe tři základní druhy tlumivek podle postavení v soustavě: podélné, příčné a uzlové.

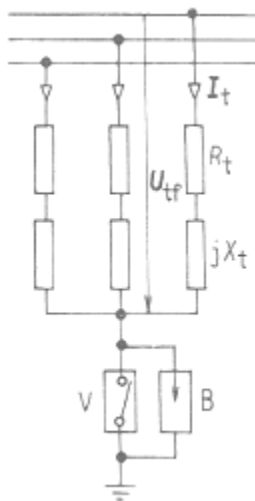
Tlumivky sériové (podélné)- Využívají se kvůli snižování proudů při zkratech, za místem kde byly zabudovány, na přijatelné hodnoty. Používáme je v sítích do 35kV, ale pouze tam, kde není jiná možnost dosáhnout snížení zkratových proudů jinými prostředky. Na obrázku 20 vidíme náhradní schéma pro jednu fázi. Pokud nejde o výpočet ztrát výkonu můžeme resistanci tlumivky R_t oproti její reaktanci X_t zanedbat $R_t \ll X_t$



Obr. 20: Impedance sériové tlumivky

Tlumivky paralelní(příčné)- Používá se nejčastěji v soustavách kde $U_n \geq 200\text{kV}$. Kompenťujeme s nimi kapacitní(nabíjecí) proudy vedení při chodu naprázdno nebo při malých zatíženích, pokud je potřeba. Na obrázku 21 vidíme základní schéma; $R_t \ll X_t$, R_t je resistance a X_t je indukční reaktance tlumivky. Když zanedbáme resistanci tak vztah pro reaktanci je:

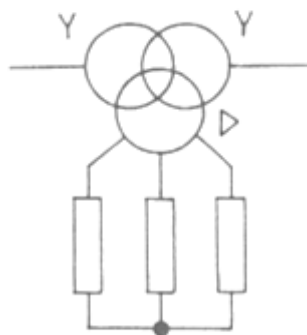
$$X_t = \frac{U_{tN}}{\sqrt{3} \cdot I_{tN}} = \frac{U_{tN}^2}{Q_{tN}} \quad (15)$$



Obr. 21: Impedance paralelní tlumivky

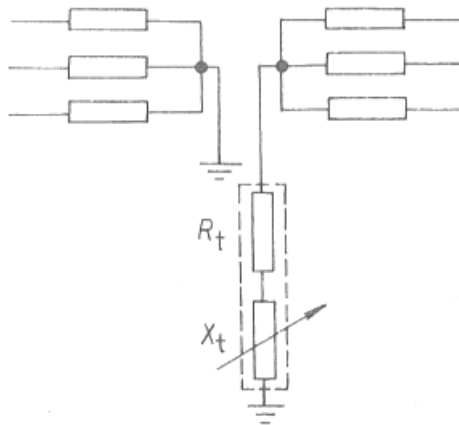
Pro zapojení v soustavě máme dva způsoby:

- Tlumivka se galvanicky spojí s vedením, jehož nabíjecí výkon kompenzuje.
- Tlumivka se připojuje do obvodu třetího vinutí transformátoru, potom je její U_n dáno jmenovitým napětím třetího vinutí, které je od 10 do 35kV.



Obr. 22: Tlumivka za třetím vinutím transformátoru

Tlumivky uzlové- V trojfázových soustavách vysokého napětí, pokud není uzel vinutí přímo spojen se zemí, můžeme vložit tlumivku mezi uzel a zem, která kompenzuje proudy při jednoduchých zemních spojeních, když je porušená izolace jedné fáze proti zemi. Pokud spojíme uzel přes resistor nebo přímo na zem, jsou poruchy izolace proti zemi zkraty. [3]

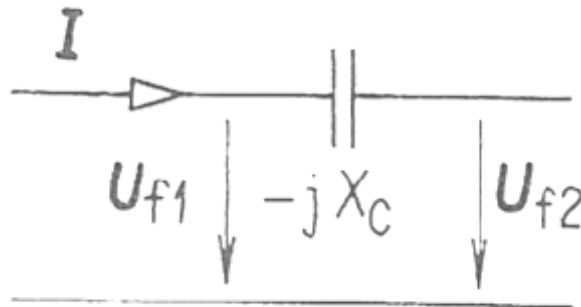


Obr. 23: Impedance uzlové tlumivky

4.2.5. Kondenzátory

V této kapitole budeme mluvit o výkonových kondenzátorech pro frekvenci 50Hz o ostatních se pouze zmíníme. Nejčastěji se používá kondenzátorová baterie vzniklá paralelním či sériovým spojením jednotlivých kondenzátorů. Činné ztráty nedosahují ani 0,5% jejich jmenovitého výkonu, když splníme podmínky které jsou dány předpisy pro jejich provoz.

Kondenzátory sériové (podélné)- Tato kondenzátorová baterie se používá jen málo, pro zlepšení napěťových poměrů v sítích do 35kV, pro úpravu parametrů, nejvíce indukční reaktance vedení, v sítích s dlouhými vedeními nad 220kV. Na obrázku 24 je základní schéma pro jednu fázi. Na tomto obrázku není brána v potaz ztráta činného výkonu, která je zanedbatelná. [3]



Obr. 24: Reaktance sériového kondenzátoru

Pro reaktanci platí:

$$X_c = \frac{1}{\omega C} \quad (16)$$

$$-jX_c = \frac{\hat{U}_{f1} - \hat{U}_{f2}}{\hat{I}} = \frac{\hat{U}_c}{\hat{I}} \Rightarrow \hat{U}_c = -jX_c \cdot \hat{I} \quad (17)$$

Na ideálním kondenzátoru je napětí zpožděno o čtvrt kmitu za proudem. Výkon kondenzátoru a napětí se mění se zatížením. Jmenovitá frekvence sítě, ve které je kondenzátor instalován je třetí parametr. Napětí sériových kondenzátorů se mění úměrně s velikostí proudu a proto se kondenzátoru používají v sítích do 35kV jako výborný prostředek pro zmenšení změn

napětí se zatížením. Hlavní nevýhoda je, že při nadproudech, zvláště při zkratech, vznikne na nich přepětí, proti kterému chráníme kondenzátory speciální velmi rychlou přepětřovou ochranou.

Kondenzátory paralelní (příčné)- Tyto kondenzátory se využívají nejvíce v průmyslových sítích do 1kV méně už v sítích nad 1kV. Na obrázku 25 je základní schéma třífázového kondenzátoru. Když zanedbáme činný výkon, uvážíme souměrnost a základní harmonické napětí a proud budou platit pro jalový výkon tyto vztahy:

- Při zapojení do trojúhelníka:

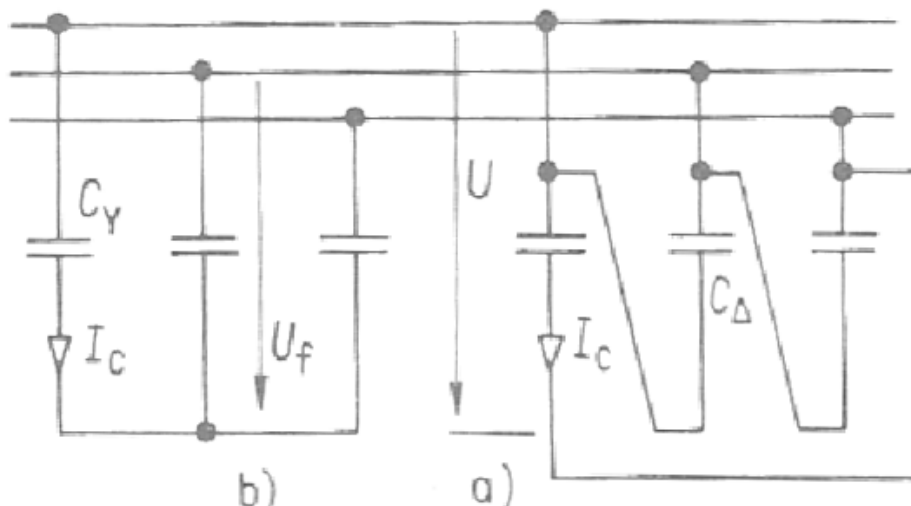
$$Q_f = U \cdot I_c = U^2 \omega C_D \quad (18)$$

- Při zapojení do hvězdy

$$Q_f = U_f \cdot I_c = U_f^2 \omega C_Y \quad (19)$$

Při stejném jalovém výkonu bude pro oba typy zapojení platit:

$$C_Y = 3C_D \quad (20)$$



Obr. 25: Třífázový kondenzátor zapojený do hvězdy a trojúhelníka

Při zanedbání ztrát činného výkonu odebírá kondenzátor připojený na síť pouze kapacitní jalový výkon. Užijeme také říci, že dodává do sítě jalový výkon indujčního charakteru obr. 26. Tato vlastnost se využívá ke kompenzaci. Na obr. 27 je vidět princip kompenzace paralelním kondenzátorem pro zlepšení účinníku. Kondenzátor je zapojen paralelně ke spotřebiči, který potřebuje odebírat nejen činný výkon ale i jalový výkon indukční. Před zapojením kondenzátoru bude pro výkon odebíraný ze sítě platit vztah:

$$P_{sn} + jQ_{sn} = P + jQ \quad (21)$$

Po připojení kondenzátoru bude výkon odebíraný ze sítě:

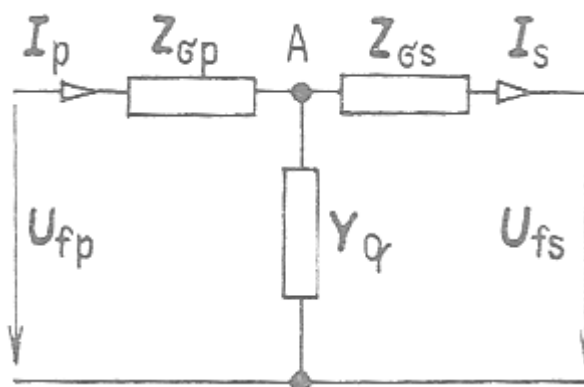
$$P_{sk} + jQ_{sk} = P + jQ - jQ_C \quad (22)$$

4.2.6. Trojfázové transformátory

Transformátory dělíme podle počtu vinutí příslušných jedné fázi na tři skupiny: dvouvinutové, trojvinutové a speciální případ, stroje více než trojvinutové. Autotransformátory tvoří zvláštní skupinu.

Trojfázové vinutí můžeme spojit do hvězdy (Y, y), do trojúhelníku (D, d) nebo do lomené hvězdy (Z, z). Jestliže je uzel hvězdy nebo lomené hvězdy vyveden, přidáváme ještě písmeno N, n. Pro vinutí s vyšším napětím se používají velká písmena a pro vinutí s nižším napětím se používají písmena malá.

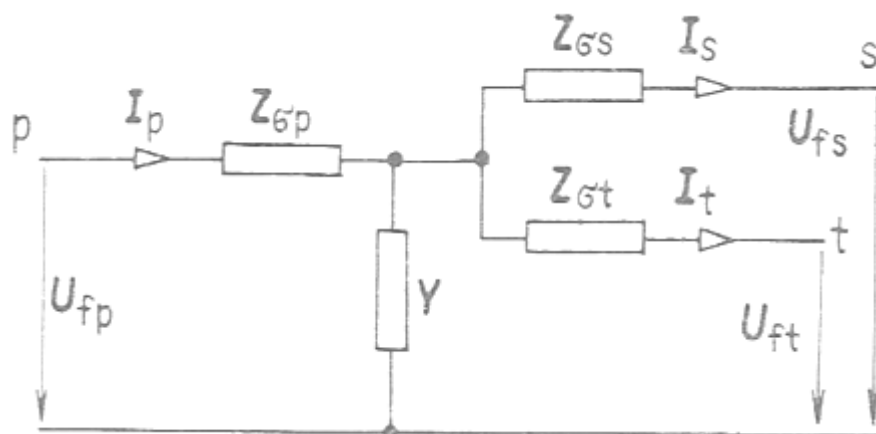
Parametry dvouvinutových transformátorů- Když zanedbáme případné nesouměrnosti v prostorovém uspořádání fází, můžeme uvážit každou fázi zvlášť. Náhradní schéma bývá ve tvaru T článku (obr. 26.) , kde bývají jednotlivé veličiny pojmenované nebo přepočtené na jedno jmenovité napětí a nebo bývají v poměrné, vztažené k jmenovitému výkonu a k jmenovitému napětí stroje. Vstupní veličiny jsou s indexem p a výstupní s indexem s. Rozptylná impedance vstupního vinutí $Z_{\sigma p}$ je tvořena rezistancí R_p a rozptylnou reaktancí $X_{\sigma p}$. $Z_{\sigma s}$ je impedance výstupního vinutí. $Y_q = G_q - jB_q$ je příčná admitance.



Obr. 26: Náhradní schéma dvouvínutového transformátoru

Výpočtem zjistíme hodnoty jednotlivých veličin a ověříme je na hotovém výrobku zkouškou naprázdno a nakrátko. [3]

Parametry trojvinutových transformátorů- Stroje se třemi vinutími na fázi jsou trojvinutové transformátory, bývají velkých výkonů. Někdy bývají konstrukčně řešeny jako tři jednofázové jednotky. Index p se používá pro označení vstupní strany jednotlivých vinutí a pro výstupní stranu se používá index s a pro stranu s vyrovnávacím vinutím se používá index t.

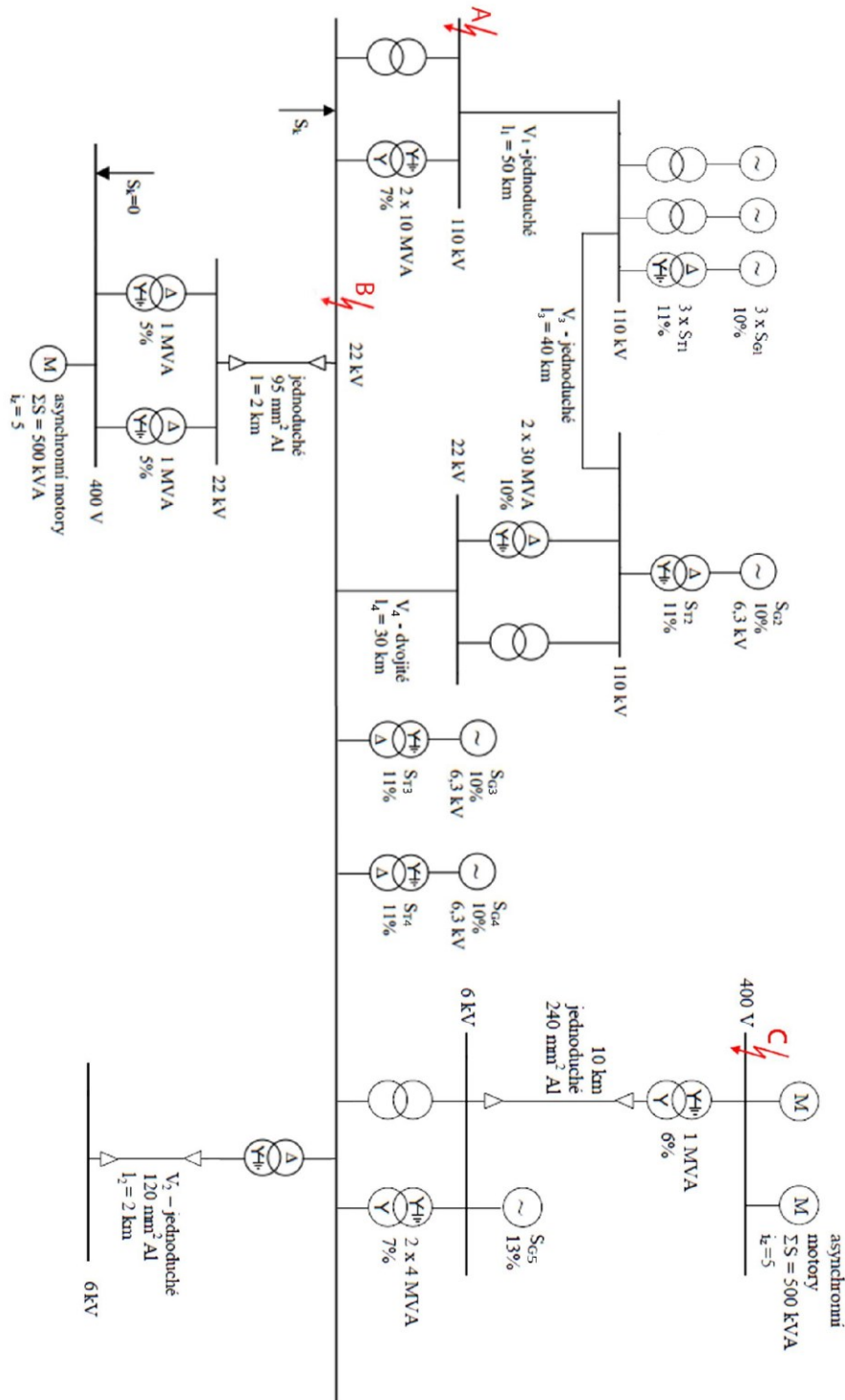


Obr. 27: Náhradní schéma trojvinutového transformátoru

Na obrázku 27 je náhradní schéma trojvinutového transformátoru. Všechny veličiny jsou pojmenované nebo vztažené na jedno ze jmenovitých napětí a nebo jsou to hodnoty poměrné, které jsou vztažené na jmenovitý výkon nebo jmenovité napětí jednoho z vinutí. Parametry, které potřebujeme pro vytvoření náhradního schématu určujeme výpočtem při návrhu a ověříme zkouškami na hotovém výrobku. [3]

5. Příklad výpočtu zkratových poměrů v přenosové soustavě

Zadání: Určete hodnoty počátečního rázového zkratového proudu pro třífázový, dvoufázový a jednofázový zkrat ve vyznačených místech zkratu.



$$S_k = 300 \text{ MVA}$$

$$X_{T1(0)} = 0,85 \cdot X_{T1(1)} = 0,85 \cdot 0,22 = 0,259$$

$$X_{T2(0)} = 0,85 \cdot X_{T2(1)} = 0,85 \cdot 0,511 = 0,434$$

$$X_{T3(0)} = 0,85 \cdot X_{T3(1)} = 0,85 \cdot 1,05 = 0,893$$

$$X_{T4(0)} = 0,85 \cdot X_{T4(1)} = 0,85 \cdot 0,5 = 0,425$$

$$X_{T6(0)} = 0,85 \cdot X_{T6(1)} = 0,85 \cdot 6 = 5,1$$

$$X_{T7(0)} = 0,85 \cdot X_{T7(1)} = 0,85 \cdot 2,625 = 2,231$$

$$X_{V1(0)} = 3 \cdot X_{V1(1)} = 3 \cdot 0,516 = 1,549$$

$$X_{V2(0)} = 3 \cdot X_{V2(1)} = 3 \cdot 1,934 = 5,802$$

$$X_{V3(0)} = 3 \cdot X_{V3(1)} = 3 \cdot 0,413 = 1,239$$

$$X_{G1(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{100 \cdot S_{nG}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{10 \cdot 300}{100 \cdot 50} = 0,2$$

$$X_{T1(1)} = \frac{u_{kT1} \cdot S_V}{100 \cdot S_{T1}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{11 \cdot 300}{100 \cdot 50} = 0,22$$

$$X_{V1(1)} = X_K \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,4165 \cdot 50 \cdot \frac{300}{110^2} = 0,516$$

$$X_{T2(1)} = \frac{u_{kT2} \cdot S_V}{100 \cdot S_{T2}} = \frac{11 \cdot 300}{100 \cdot 65} = 0,511$$

$$X_{T3(1)} = \frac{u_{kT3} \cdot S_V}{100 \cdot S_{T3}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7 \cdot 300}{100 \cdot 10} = 1,05$$

$$X_{G2(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{100 \cdot S_{nG2}} = \frac{10 \cdot 300}{100 \cdot 65} = 0,46$$

$$X_{V2(1)} = X_{K2} \cdot l_2 \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,104 \cdot 30 \cdot \frac{300}{22^2} = 1,934$$

$$X_{V3(1)} = X_{K3} \cdot l_3 \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,4165 \cdot 40 \cdot \frac{300}{110^2} = 0,413$$

$$X_{V4(1)} = X_{K4} \cdot l_4 \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,097 \cdot 2 \cdot \frac{300}{22^2} = 0,12$$

$$R_{V4(1)} = R_{K4} \cdot l_4 \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,299 \cdot 2 \cdot \frac{300}{22^2} = 0,371$$

$$X_{V5(1)} = X_{K5} \cdot l_5 \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,104 \cdot 2 \cdot \frac{300}{22^2} = 0,129$$

$$R_{V5(1)} = R_{K5} \cdot l_5 \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,378 \cdot 2 \cdot \frac{300}{22^2} = 0,469$$

$$X_{G3(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{100 \cdot S_{nG3}} = \frac{7 \cdot 300}{100 \cdot 5} = 4,2$$

$$X_{T4(1)} = \frac{u_{kT4} \cdot S_V}{100 \cdot S_{T4}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{10 \cdot 300}{100 \cdot 30} = 0,5$$

$$X_{T5(1)} = \frac{u_{kT3} \cdot S_V}{100 \cdot S_{T3}} = \frac{8 \cdot 300}{100 \cdot 5} = 4,8$$

$$X_{G4(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{100 \cdot S_{nG4}} = \frac{7 \cdot 300}{100 \cdot 4} = 5,25$$

$$X_{T6(1)} = \frac{u_{kT6} \cdot S_V}{100 \cdot S_{T6}} = \frac{8 \cdot 300}{100 \cdot 4} = 6$$

$$X_{T7(1)} = \frac{u_{kT} \cdot S_V}{100 \cdot S_T} = \frac{1}{2} \cdot \frac{7 \cdot 300}{100 \cdot 4} = 2,625$$

$$X_{T8(1)} = \frac{u_{kT} \cdot S_V}{100 \cdot S_T} = \frac{6 \cdot 300}{100 \cdot 1} = 18$$

$$X_{V6(1)} = X_K \cdot l \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,078 \cdot 10 \cdot \frac{300}{6^2} = 6,5$$

$$R_{V6(1)} = R_{K6} \cdot l_6 \cdot \frac{S_V}{U_S^2} = 0,149 \cdot 10 \cdot \frac{300}{6^2} = 12,41$$

$$X_{G5(1)} = \frac{x_d'' \cdot S_V}{100 \cdot S_{nG5}} = \frac{13 \cdot 300}{100 \cdot 6} = 6,5$$

$$X_{T9(1)} = \frac{u_{kT} \cdot S_V}{100 \cdot S_T} = \frac{1}{2} \cdot \frac{5 \cdot 300}{100 \cdot 1} = 7,5$$

$$X_{T10(1)} = \frac{u_{kT} \cdot S_V}{100 \cdot S_T} = \frac{6 \cdot 300}{100 \cdot 1} = 18$$

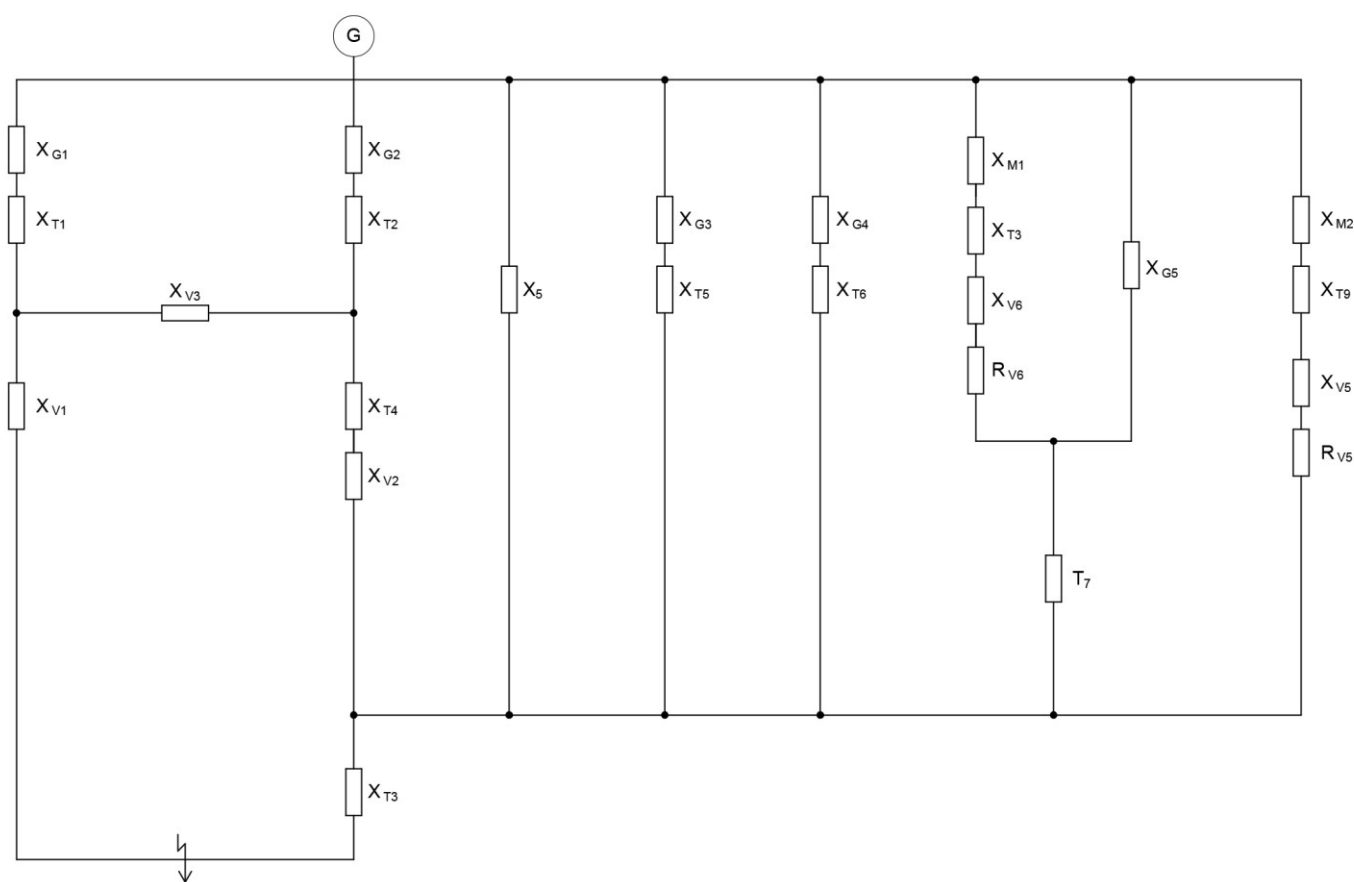
$$X_{AM1(1)} = \frac{S_V}{i_z \cdot S_{nM}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{300}{5 \cdot 0,5} = 60$$

$$X_{AM2(1)} = \frac{S_V}{i_z \cdot S_{nM}} = \frac{300}{5 \cdot 0,5} = 120$$

$$X_S = c \cdot \frac{S_V}{S_V} = 1,1 \cdot \frac{300}{300} = 1,1$$

Výpočet počátečních rázových zkratových proudů pomocí proměnných hodnot impedancí:

Náhradní schéma sousledné složky v místě zkratu A:



Přepočet z Y na D:

$$\hat{X}'_{1(1)} = \hat{X}_{G2(1)} + \hat{X}_{T2(1)} = 0,46 + 0,511 = 0,971 \Omega$$

$$\hat{X}'_{2(1)} = \hat{X}_{V3(1)} = 0,413 \Omega$$

$$\hat{X}'_{3(1)} = \hat{X}_{V2(1)} + \hat{X}_{T4(1)} = 1,934 + 0,5 = 2,434 \Omega$$

$$\hat{X}_{A(1)} = \hat{X}'_{3(1)} + \hat{X}'_{2(1)} + \frac{\hat{X}'_{3(1)} \cdot \hat{X}'_{2(1)}}{\hat{X}'_{1(1)}} = 2,434 + 0,413 + \frac{2,434 \cdot 0,413}{0,971} = 3,88 \Omega$$

$$\hat{X}_{B(1)} = \hat{X}'_{3(1)} + \hat{X}'_{1(1)} + \frac{\hat{X}'_{3(1)} \cdot \hat{X}'_{1(1)}}{\hat{X}'_{2(1)}} = 2,434 + 0,971 + \frac{2,434 \cdot 0,971}{0,413} = 9,13\Omega$$

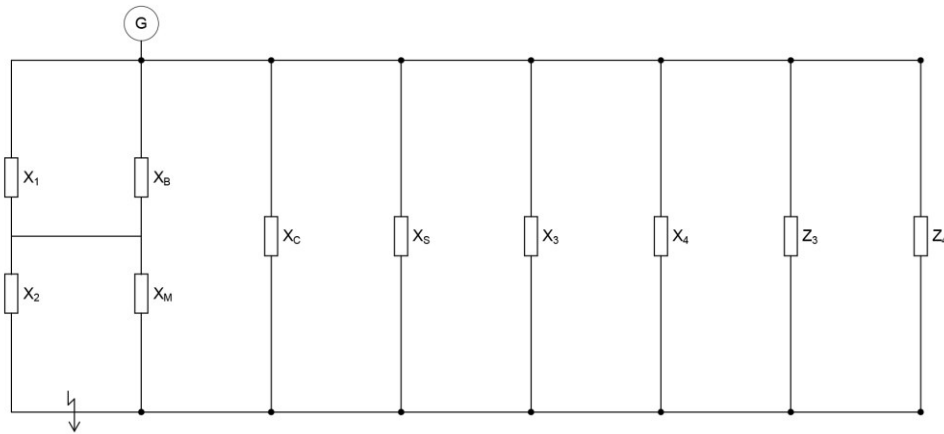
$$\hat{X}_{C(1)} = \hat{X}'_{1(1)} + \hat{X}'_{2(1)} + \frac{\hat{X}'_{1(1)} \cdot \hat{X}'_{2(1)}}{\hat{X}'_{3(1)}} = 0,971 + 0,413 + \frac{0,971 \cdot 0,413}{2,434} = 1,797\Omega$$

$$\hat{X}_{1(1)} = \hat{X}_{G1(1)} + \hat{X}_{T1(1)} = 0,2 + 0,22 = 0,42\Omega$$

$$\frac{1}{\hat{X}_{B1(1)}} = \frac{1}{\hat{X}_{1(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{B(1)}} = \frac{1}{0,42} + \frac{1}{9,13} = 2,49 \Rightarrow X_{B1(1)} = 0,401\Omega$$

$$\hat{X}_{2(1)} = \hat{X}_{T3(1)} + \hat{X}_{V1(1)} = 1,05 + 0,516 = 1,566\Omega$$

$$\frac{1}{\hat{X}_{A1(1)}} = \frac{1}{\hat{X}_{2(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{A(1)}} = \frac{1}{1,566} + \frac{1}{3,88} = 0,89 \Rightarrow X_{A1(1)} = 1,116\Omega$$



$$\hat{X}_{7(1)} = \hat{X}_{A1(1)} + \hat{X}_{B1(1)} = 1,116 + 0,401 = 1,517\Omega$$

$$\hat{X}_{3(1)} = \hat{X}_{G3(1)} + \hat{X}_{T5(1)} = 4,2 + 4,8 = 9\Omega$$

$$\hat{X}_{4(1)} = \hat{X}_{G4(1)} + \hat{X}_{T6(1)} = 5,25 + 6 = 11,25\Omega$$

$$\hat{Z}_{1(1)} = \hat{X}_{M1(1)} + \hat{X}_{T8(1)} + \hat{X}_{V6(1)} + R_{V6(1)} = 12,41 + j(60 + 18 + 6,5) = (12,41 + j84,5)\Omega = 85,41\angle 81,65^\circ\Omega$$

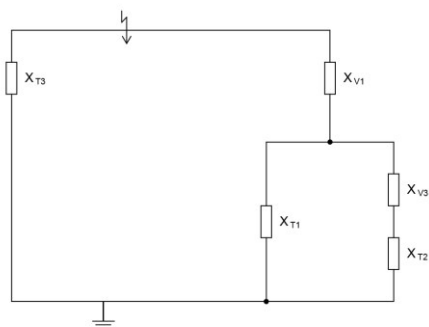
$$\frac{1}{\hat{Z}_{2(1)}} = \frac{1}{\hat{Z}_{1(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{G5(1)}} = \frac{1}{85,41\angle 81,65^\circ} + \frac{1}{j6,5} = (0,0017 - j0,012) + j0,153 = (0,0017 + j0,141) = 0,156\angle -4,41^\circ \Rightarrow \hat{Z}_{2(1)} = 6,41\angle 4,41^\circ\Omega$$

$$\hat{Z}_{3(1)} = \hat{Z}_{2(1)} + \hat{X}_{T7(1)} = (0,874 + j5,96) + 2,625 = (0,874 + j8,585)\Omega = 8,629\angle 84,18^\circ\Omega$$

$$\hat{Z}_{4(1)} = \hat{X}_{M2(1)} + \hat{X}_{T9(1)} + \hat{X}_{V5(1)} + R_{V5(1)} = 0,469 + j(120 + 7,5 + 0,129) = (0,469 + j127,63)\Omega = 127,63\angle 89,78^\circ\Omega$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\hat{Z}_{(1)}} &= \frac{1}{\hat{X}_{7(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{C(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{S(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{3(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{4(1)}} + \frac{1}{\hat{Z}_{3(1)}} + \frac{1}{\hat{Z}_{4(1)}} = \frac{1}{j1,517} + \frac{1}{j1,797} + \frac{1}{j1,1} + \frac{1}{j9} + \frac{1}{j11,25} + \\ &+ \frac{1}{8,629\angle 84,18^\circ} + \frac{1}{127,63\angle 89,78^\circ} = j0,659 + j0,556 + j0,909 + j0,11 + j0,089 + 0,116\angle -84,18^\circ + \\ &+ 0,0078\angle -89,78^\circ = j0,659 + j0,556 + j0,909 + j0,11 + j0,089 + (0,012 - j0,12) + (0 - j0,0078) = \\ &= (0,012 + j2,195) = 2,195\angle -89,68^\circ \Rightarrow 0,403\angle 89,68^\circ \end{aligned}$$

Náhradní schéma nulové složky v místě zkratu A:



$$\begin{aligned} \frac{1}{\hat{X}_{1(0)}} &= \frac{1}{\hat{X}_{T1(0)}} + \frac{1}{\hat{X}_{V2(0)} + \hat{X}_{T2(0)}} = \frac{1}{j0,259} + \frac{1}{j(5,802 + 0,434)} = j3,86 + j0,16 = 4,02 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \hat{X}_{1(0)} = 0,249\Omega \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\hat{Z}_{(0)}} &= \frac{1}{\hat{X}_{T3(0)}} + \frac{1}{\hat{X}_{1(0)} + \hat{X}_{V1(0)}} = \frac{1}{j0,425} + \frac{1}{j(0,249 + 1,548)} = j2,353 + j0,556 = 2,909 \Rightarrow \\ &\Rightarrow \hat{Z}_{(0)} = 0,344\angle 90^\circ\Omega \end{aligned}$$

$$\hat{Z}_{(1)} = \hat{Z}_{(2)} = 0,403\angle 89,68^\circ\Omega$$

$$\begin{aligned} 2\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(0)} &= 2 \cdot 0,403\angle 89,68^\circ + 0,344\angle 90^\circ = 0,806\angle 89,68^\circ + 0,344\angle 90^\circ = \\ &= (0 + j0,805) + (0 + j0,344) = (0 + j0,375) = \underline{\underline{1,149\angle 48,97^\circ\Omega}} \end{aligned}$$

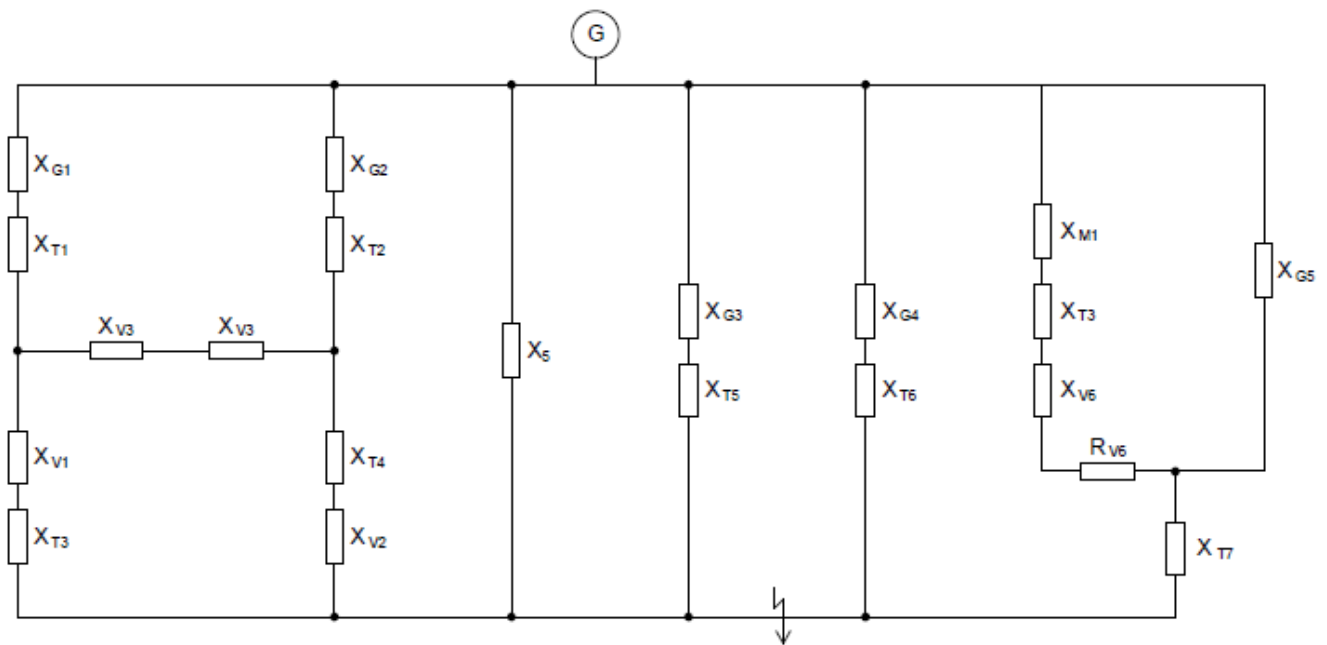
$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 110} = \underline{\underline{1,575 \text{ kA}}}$$

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 1,575}{0,403} = \underline{\underline{4,728 \text{ kA}}}$$

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 1,575}{0,806} = \underline{\underline{3,723 \text{ kA}}}$$

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot 3 \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)}|} = \frac{1,1 \cdot 3 \cdot 1,575}{1,149} = \underline{\underline{4,523 \text{ kA}}}$$

Náhradní schéma sousledné složky v místě zkratu B:



$$\hat{X}'_{1(l)} = \hat{X}_{G2(l)} + \hat{X}_{T2(l)} = 0,46 + 0,511 = 0,971 \Omega$$

$$\hat{X}'_{2(l)} = \hat{X}_{V3(l)} = 0,413 \Omega$$

$$\hat{X}'_{3(l)} = \hat{X}_{V2(l)} + \hat{X}_{T4(l)} = 1,934 + 0,5 = 2,434 \Omega$$

$$\hat{X}_{A(l)} = \hat{X}'_{3(l)} + \hat{X}'_{2(l)} + \frac{\hat{X}'_{3(l)} \cdot \hat{X}'_{2(l)}}{\hat{X}'_{1(l)}} = 2,434 + 0,413 + \frac{2,434 \cdot 0,413}{0,971} = 3,88 \Omega$$

$$\hat{X}_{B(1)} = \hat{X}'_{3(1)} + \hat{X}'_{1(1)} + \frac{\hat{X}'_{3(1)} \cdot \hat{X}'_{1(1)}}{\hat{X}'_{2(1)}} = 2,434 + 0,971 + \frac{2,434 \cdot 0,971}{0,413} = 9,13\Omega$$

$$\hat{X}_{C(1)} = \hat{X}'_{1(1)} + \hat{X}'_{2(1)} + \frac{\hat{X}'_{1(1)} \cdot \hat{X}'_{2(1)}}{\hat{X}'_{3(1)}} = 0,971 + 0,413 + \frac{0,971 \cdot 0,413}{2,434} = 1,797\Omega$$

$$\hat{X}_{1(1)} = \hat{X}_{G1(1)} + \hat{X}_{T1(1)} = 0,2 + 0,22 = 0,42\Omega$$

$$\frac{1}{\hat{X}_{B1(1)}} = \frac{1}{\hat{X}_{1(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{B(1)}} = \frac{1}{0,42} + \frac{1}{9,13} = 2,49 \Rightarrow X_{B1(1)} = 0,401\Omega$$

$$\hat{X}_{2(1)} = \hat{X}_{T3(1)} + \hat{X}_{V1(1)} = 1,05 + 0,516 = 1,566\Omega$$

$$\frac{1}{\hat{X}_{A1(1)}} = \frac{1}{\hat{X}_{2(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{A(1)}} = \frac{1}{1,566} + \frac{1}{3,88} = 0,89 \Rightarrow X_{A1(1)} = 1,116\Omega$$

$$\hat{X}_{6(1)} = \hat{X}_{A1(1)} + \hat{X}_{B1(1)} = 1,116 + 0,401 = 1,517\Omega$$

$$\hat{X}_{3(1)} = \hat{X}_{G3(1)} + \hat{X}_{T5(1)} = 4,2 + 4,8 = 9\Omega$$

$$\hat{X}_{4(1)} = \hat{X}_{G4(1)} + \hat{X}_{T6(1)} = 5,25 + 6 = 11,25\Omega$$

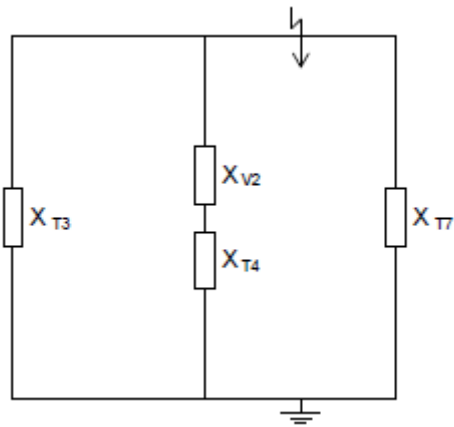
$$\hat{Z}_{7(1)} = \hat{X}_{M1(1)} + \hat{X}_{T8(1)} + \hat{X}_{V6(1)} + R_{V6} = 12,417 + j(60 + 18 + 6,5) = (12,417 + j84,5)\Omega = 85,407\angle 81,64^\circ\Omega$$

$$\frac{1}{\hat{Z}_{8(1)}} = \frac{1}{\hat{Z}_{7(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{G5(1)}} = \frac{1}{85,407\angle 81,64^\circ} + \frac{1}{6,5} = 0,117\angle -81,64^\circ + 0,154 = (0,017 - j0,116) + 0,154 = (0,017 + j0,038) = 0,04\angle -65,89^\circ \Rightarrow \hat{Z}_{8(1)} = 24\angle 65,89^\circ\Omega = (9,8 + j21,9)\Omega$$

$$\hat{Z}_{5(1)} = \hat{Z}_{8(1)} + \hat{X}_{T7(1)} = (9,8 + j21,9) + j2,625 = (6,042 + j24,525)\Omega = 25,26\angle 76,16^\circ\Omega$$

$$\begin{aligned} \frac{1}{\hat{Z}_{(1)}} &= \frac{1}{\hat{X}_{6(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{C(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{S(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{3(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{4(1)}} + \frac{1}{\hat{Z}_{5(1)}} = \frac{1}{1,517} + \frac{1}{1,797} + \frac{1}{1,1} + \frac{1}{9} + \frac{1}{11,25} + \\ &+ \frac{1}{25,26\angle 76,16^\circ} = j0,659 + j0,556 + j0,909 + j0,111 + j0,089 + 0,04\angle -76,16^\circ = \\ &= j0,659 + j0,556 + j0,909 + j0,11 + j0,089 + (0,0096 - j0,03) = \\ &= (0,0096 + j2,293) = 2,293\angle -89,76^\circ \Rightarrow 0,436\angle 89,76^\circ \end{aligned}$$

Náhradní schéma nulové složky v místě zkratu B:



$$\frac{1}{\hat{Z}_{(0)}} = \frac{1}{\hat{X}_{T3(0)}} + \frac{1}{\hat{X}_{V2(0)} + \hat{X}_{T4(0)}} + \frac{1}{\hat{X}_{T7(0)}} = \frac{1}{j0,893} + \frac{1}{j(5,802 + 0,425)} + \frac{1}{j2,231} = 1,729$$

$$\hat{Z}_{(0)} = \frac{1}{j1,729} = \underline{\underline{0,578 \angle 90^\circ \Omega}}$$

$$\hat{Z}_{(1)} = \hat{Z}_{(2)} = 0,436 \angle 89,76^\circ \Omega$$

$$\begin{aligned} 2\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(0)} &= 2 \cdot 0,436 \angle 89,76^\circ + 0,578 \angle 90^\circ = 0,872 \angle 89,76^\circ + 0,578 \angle 90^\circ = \\ &= (0,004 + j0,87) + (0 + j0,578) = (0,004 + j1,448) = \underline{\underline{1,448 \angle 89,84^\circ \Omega}} \end{aligned}$$

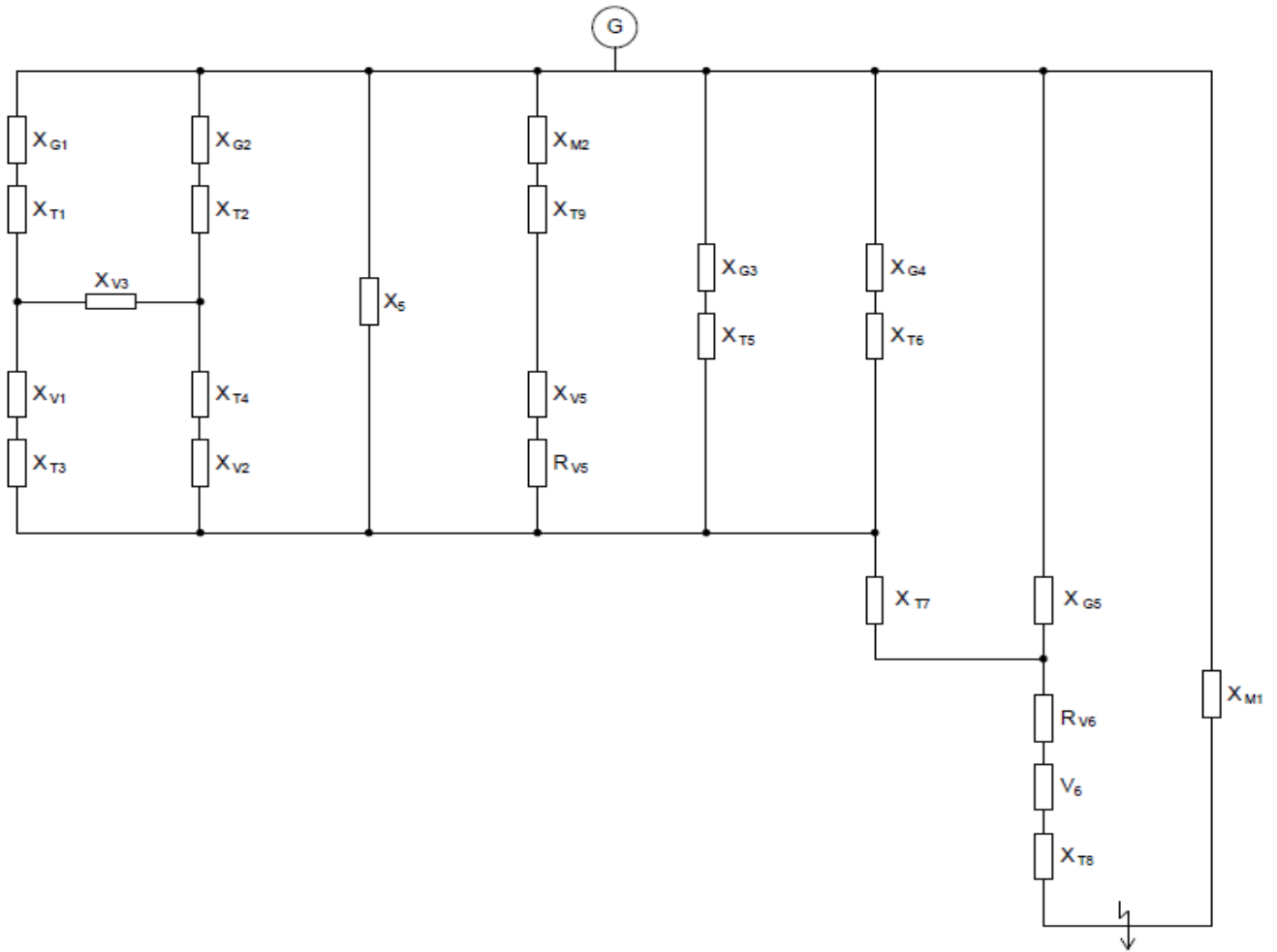
$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 22} = \underline{\underline{7,87 kA}}$$

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 1,57}{0,436} = \underline{\underline{20,61 kA}}$$

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 7,87}{0,872} = \underline{\underline{17,19 kA}}$$

$$I_{k1}'' = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)}|} = \frac{1,1 \cdot 7,87 \cdot 3}{1,448} = \underline{\underline{17,94 kA}}$$

Náhradní schéma sousledné složky v místě zkratu C:



$$\hat{X}_{7(l)} = 1,517\Omega$$

$$\hat{X}_{2(l)} = \hat{X}_{G3(l)} + \hat{X}_{T5(l)} = 4,2 + 4,8 = 9\Omega$$

$$\hat{X}_{3(l)} = \hat{X}_{G4(l)} + \hat{X}_{T6(l)} = 5,25 + 6 = 11,25\Omega$$

$$\begin{aligned}\hat{Z}_{1(l)} &= \hat{X}_{M2(l)} + \hat{X}_{T9(l)} + \hat{X}_{V5(l)} + R_{V5(l)} = 0,469 + j(120 + 7,5 + 0,129) = (0,469 + j127,627)\Omega = \\ &= 127,63\angle 89,79^\circ\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\frac{1}{\hat{Z}_{2(l)}} &= \frac{1}{\hat{Z}_{1(l)}} + \frac{1}{\hat{X}_{7(l)}} + \frac{1}{\hat{X}_{2(l)}} + \frac{1}{\hat{X}_{3(l)}} = \frac{1}{127,63\angle 89,79^\circ} + \frac{1}{j1,517} + \frac{1}{j9} + \frac{1}{j11,25} = 0,008\angle -89,79^\circ + \\ &+ j0,659 + j0,111 + j0,089 = (0 + j0,859) = 0,859\angle -90^\circ \Rightarrow \hat{Z}_{2(l)} = 1,164\angle 90^\circ\Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\hat{Z}_{3(l)} &= \hat{Z}_{2(l)} + \hat{X}_{T7(l)} = (0 + j1,164) + j2,625 = (0 + j3,789)\Omega = \\ &= 3,789\angle 90^\circ\Omega\end{aligned}$$

$$\frac{1}{\hat{Z}_{4(1)}} = \frac{1}{\hat{Z}_{3(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{G5(1)}} = \frac{1}{3,789 \angle 90^\circ} + \frac{1}{j6,5} = 0,264 \angle -90^\circ + j0,154 =$$

$$= (0 - j0,11) = 0,11 \angle -90^\circ \Rightarrow 9,09 \angle 90^\circ \Omega = (0 + j9,09) \Omega$$

$$\hat{Z}_{5(1)} = \hat{X}_{T8(1)} + \hat{X}_{V6(1)} + R_{V6(1)} = 12,41 + j(6,5 + 18) = (12,41 + j24,5) \Omega =$$

$$= 27,464 \angle 63,14^\circ \Omega$$

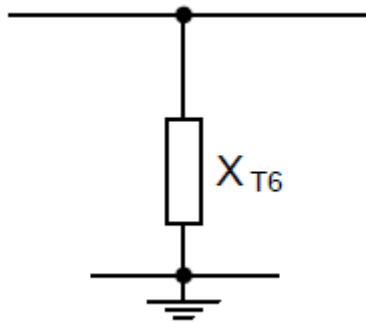
$$\hat{Z}_{6(1)} = \hat{Z}_{4(1)} + \hat{Z}_{5(1)} = (0 + j9,09) + (12,41 + j24,5) = (12,41 + j33,59) \Omega =$$

$$= 35,8 \angle 69,72^\circ \Omega$$

$$\frac{1}{\hat{Z}_{(1)}} = \frac{1}{\hat{Z}_{6(1)}} + \frac{1}{\hat{X}_{M1(1)}} = \frac{1}{35,8 \angle 69,72^\circ} + \frac{1}{j60} = 0,028 \angle -69,72^\circ + j0,017 =$$

$$= (0,01 - j0,01) = 0,014 \angle -45^\circ \Rightarrow 71,43 \angle 45^\circ \Omega = (50,51 + j50,51) \Omega$$

Náhradní schéma nulové složky v místě zkratu C:



$$\hat{Z}_{(1)} = \hat{Z}_{(2)} = 71,43 \angle 45^\circ \Omega$$

$$\hat{Z}_{(0)} = 5,1 \angle 90^\circ$$

$$2\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(0)} = 2 \cdot 71,43 \angle 45^\circ + 5,1 \angle 90^\circ = 142,86 \angle 45^\circ + 5,1 \angle 90^\circ =$$

$$= (101,02 + j101,02) + (0 + j5,1) = (101,02 + j106,12) = \underline{\underline{146,51 \angle 46,41^\circ \Omega}}$$

$$I_V = \frac{S_V}{\sqrt{3} \cdot U_V} = \frac{300}{\sqrt{3} \cdot 0,4} = \underline{\underline{433 \text{ kA}}}$$

$$I''_{k3} = \frac{c \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)}|} = \frac{1,1 \cdot 433}{71,43} = \underline{\underline{6,668 \text{ kA}}}$$

$$I''_{k2} = \frac{c \cdot \sqrt{3} \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)}|} = \frac{1,1 \cdot \sqrt{3} \cdot 433}{142,86} = \underline{\underline{5,775 \text{ kA}}}$$

$$I''_{k1} = \frac{c \cdot 3 \cdot I_V}{|\hat{Z}_{(1)} + \hat{Z}_{(2)} + \hat{Z}_{(0)}|} = \frac{1,1 \cdot 3 \cdot 433}{146,51} = \underline{\underline{9,753 \text{ kA}}}$$

6. Závěr

Jedna z nejzávažnějších poruch v elektrizačních soustavách jsou zkraty. Zkraty musí být předvídaný a musíme umět spočítat jejich velikost. Účinky zkratových proudů musíme kontrolovat na přípojnicích, kabelech, odpínačích, vypínačích atd. Pokud tak neučiníme může dojít k poškození elektrických zařízení a dalším jiným nepříjemnostem.

V úvodu práce byly vysvětleny zkraty jako takové. V další části této práce byly teoreticky popsány zásady pro výpočet zkratových proudů podle normy ČSN 60909-0 a také parametry prvků soustavy jako jsou například: kondenzátory, tlumivky a transformátory. V poslední části bakalářské práce jsem věnoval praktickému výpočtu zkratu ve dvou místech ES.

K praktickému výpočtu zkratu jsem použil imaginární rozvodnou síť a vypočítal jsem hodnoty počátečního rázového zkratového proudu pro třífázový, dvoufázový a jednofázový zkrat pomocí metody, která počítá pouze s proměnnými hodnotami zkratových impedancí. Tuto metodu jsem zvolil, protože se mi zdá nejlepší, díky usnadnění zvolením vztažného výkonu, se kterým se dále vypočítají všechny proměnné impedance. S vypočtenými proudy z příkladu by se dále dalo pracovat například při výpočtech dimenzování vedení, přípojníc, pojistek, odpojovačů, transformátorů aj. Těmito výpočty jsem se dále nezabýval, protože to nebylo cílem mé bakalářské práce.

Literatura

- [1] Hradílek Z.: Elektroenergetika II.- Zkraty, přepětí, stabilita, průmyslová energetika, Ostrava, SNTL, 1993.
- [2] Trojánek Z., Hájek J., Kvasnica P.: Přechodové jevy v elektrizačních soustavách, Praha, SNTL, 1987.
- [3] Hodinka M., Fecko Š., Němeček F.: Přenos a rozvod elektrické energie, Praha, SNTL, 1989.
- [4] ČSN EN 60909-0 Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách- Část 0: Výpočet proudu. Český normalizační institut, 2002.